

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Mauricio Rigoni**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE FALTAS EM  
GERADORES SÍNCRONOS  
POR MEIO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

**FLORIANÓPOLIS  
2014**



Mauricio Rigoni

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE FALTAS EM  
GERADORES SÍNCRONOS  
POR MEIO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Nelson J. Batistela

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis, Dezembro de 2014.





Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rigoni, Mauricio

Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de  
faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético  
externo / Mauricio Rigoni ; orientador, Nelson Jhoe  
Batistela ; coorientador, Nelson Sadowski. - Florianópolis,  
SC, 2014.

156 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. máquina síncrona, motor de  
indução trifásico. 3. falta, falha. 4. sensor de campo  
magnético. 5. instrumentação virtual. I. Batistela, Nelson  
Jhoe. II. Sadowski, Nelson. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica. IV. Título.



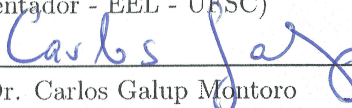
Mauricio Rigoni

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE FALTAS EM  
GERADORES SÍNCRONOS  
POR MEIO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.



Prof. Dr. Nelson Jhoé Batistela  
(Orientador - EEL - UFSC)



Prof. Dr. Carlos Galup Montoro  
(Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica)

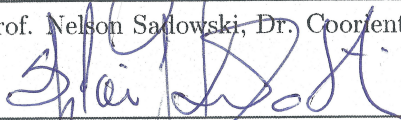
Banca Examinadora:



Prof. Nelson Jhoé Batistela, Dr. Orientador



Prof. Nelson Sadowski, Dr. Coorientador



Prof. Silvio Ikuyo Nabeta, Dr.



Prof. Pedro Armando da Silva Jr., Dr.



Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.



*Dedico este trabalho aos meus pais, Delvino e Dirce,  
doutores honoris causa na formação de um Lar.*

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho resulta da soma de esforços de várias pessoas, pelo que agradeço sinceramente:

aos professores Nelson Jhoe Batistela e Nelson Sadowski pela orientação e coorientação, e pelas importantes contribuições técnicas em diversas etapas do doutoramento;

ao professor Arnulf Kost pela coorientação e acolhimento durante o período de estágio na Alemanha;

ao professor Silvio Ikuyo Nabeta pela relatoria deste trabalho;

aos professores membros da banca Pedro Armando da Silva Jr. e Walter Pereira Carpes Jr. pelas correções da versão final da tese;

aos professores do GRUCAD, Jean Viane Leite, João Pedro Assumpção Bastos, Maurício Valência da Luz e Patrick Kuo-Peng pela prestimosidade em diversas ocasiões;

ao laboratorista Cristian Mazzola pelo auxílio na instalação da bancada de ensaios;

às agências de fomento CNPq e CAPES pelo financiamento de parte desta pesquisa;

à empresa Tractebel Energia S.A. e seus colaboradores, em especial ao engenheiro Luciano Mendes de Freitas, que por meio do Programa de Fomento da ANEEL para Pesquisa e Desenvolvimento no Setor Elétrico Brasileiro viabilizou a parte experimental deste trabalho;

aos nobres colegas e amigos Conrado Gameiro, Helton dos Santos, Leonardo Feler e Ricardo Elias pelas imprescindíveis contribuições na montagem de protótipos;

à minha querida esposa Lidiane, e aos grandes amigos Fábio Fujita, Francielly Staudt, Marconi Januário, Tiago Staudt e Túlio dos Santos, que voluntariamente me estenderam a mão nos trechos mais íngremes da caminhada.

Muito obrigado!

*“Se necessário for, deixemos de construir uma ponte sobre o rio, dando uma volta maior naquele trecho, e lancemos pelo menos um arco sobre o mais escuro golfo da ignorância que nos rodeia.”*  
*(H. D. Thoreau)*

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DE FALTAS EM GERADORES SÍNCRONOS POR MEIO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

**Mauricio Rigoni**

Dezembro/2014

Orientador: Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos

Palavras-chave: máquina síncrona; motor de indução trifásico; gerador; falta; falha; sensor de campo magnético; instrumentação virtual.

Número de Páginas: xii + 138

Esta tese apresenta o desenvolvimento de um equipamento e de uma metodologia para detecção e análise de faltas em máquinas elétricas, especialmente geradores síncronos, por meio da medição do seu campo magnético externo com um único sensor de campo tipo bobina-sonda. Os sensores de campo magnético, o aparato correlato de condicionamento analógico e digital do sinal, bem como a metodologia de avaliação dos dados foram também desenvolvidos neste trabalho. O sistema é capaz de detectar faltas em motores de indução trifásicos e em máquinas síncronas. Uma bancada foi especificada para a introdução controlada de faltas em geradores síncronos e aplicada neste trabalho. O equipamento foi empregado em medições de campos externos de geradores de usinas hidrelétricas.



Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DETECTION  
AND EVALUATION OF FAULTS IN  
SYNCHRONOUS GENERATORS  
THROUGH THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD**

**Mauricio Rigoni**

December/2014

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Key words: synchronous machine; three-phase induction motor; generator; fault; failure; magnetic field sensor; virtual instrumentation.

Number of Pages: xii + 138

This thesis presents the development of an equipment and a methodology for detection and analysis of faults in electrical machines, especially synchronous generators, using measurements of their external magnetic field taken with a single induction sensor. The magnetic field sensors, the apparatus correlated for analog and digital signal conditioning, as well as the methodology for evaluation of the data were also developed in this work. The system is able to detect faults in three-phase induction motors and synchronous machines. A workbench was specified for the controlled introduction of faults in synchronous generators and applied in this work. The equipment was used in measurements of the external magnetic fields of hydroelectric generators.



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Posicionamento do Problema e Motivação da Pesquisa . . . . .	1
1.2	Objetivos e Contribuições da Tese . . . . .	5
1.3	Estrutura de Apresentação do Trabalho . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Avaliação de Faltas em Máquinas Elétricas pelo Campo Magnético Externo</b>	<b>9</b>
2.1	O Campo Magnético Externo . . . . .	11
2.2	Faltas em Motores de Indução Trifásicos . . . . .	17
2.3	Faltas em Máquinas Síncronas . . . . .	22
2.4	Considerações Finais do Capítulo . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Estudo da Composição Espectral de Formas de Onda com Assimetria em uma Máquina Síncrona</b>	<b>33</b>
3.1	Avaliação do Espectro da Função $B(t)$ pelo Cálculo da Série de Fourier . . . . .	36
3.2	Avaliação do Espectro do Fluxo de Entreferro por Meio de Simulações em Elementos Finitos . . . . .	42
3.3	Considerações Finais do Capítulo . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Sistema de Medição de Campos Magnéticos e Testes Iniciais de Detecção de Faltas</b>	<b>47</b>
4.1	Desenvolvimento e Construção do Protótipo de Medição de Campos Magnéticos . . . . .	47
4.1.1	Sensores de Campo por Indução . . . . .	48
4.1.2	Condicionamento de Sinais . . . . .	50
4.1.3	Aquisição de Dados . . . . .	51
4.1.4	Aferição . . . . .	55
4.2	Testes de Detecção de Faltas em Motores de Indução Trifásicos . . . . .	56

4.2.1	Detecção de Barras Rompidas . . . . .	57
4.2.2	Detecção de Excentricidades . . . . .	60
4.3	Testes de Detecção de Faltas em Geradores Síncronos . . . . .	64
4.3.1	Estudos em Máquina Síncrona Didática . . . . .	65
4.3.2	Estudos em Gerador Hidroelétrico . . . . .	66
4.4	Considerações Finais do Capítulo . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Bancada de Simulação de Defeitos em Geradores Síncronos</b>	<b>71</b>
5.1	Especificações da Bancada . . . . .	71
5.2	Detalhes Construtivos para Imposição Controlada de Defeitos . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Resultados Experimentais para Análise de Desempenho do Método de Detecção de Faltas</b>	<b>83</b>
6.1	Ruído Magnético Ambiente . . . . .	84
6.2	Avaliação de Sub-Harmônicas . . . . .	86
6.2.1	Influência do ruído na região espectral das sub-harmônicas . . . . .	86
6.2.2	Comparação entre os espectros internos e externos na região das sub-harmônicas . . . . .	87
6.2.3	Influência do posicionamento dos sensores de campo magnético externo . . . . .	88
6.2.4	Influência da carga na região espectral das sub-harmônicas . . . . .	89
6.3	Detecção de Curto-Circuitos no Enrolamento de Campo . . . . .	90
6.4	Detecção de Excentricidade Estática . . . . .	91
6.5	Detecção de Curto-Circuitos Entre Lâminas do Núcleo . . . . .	95
6.6	Detecção de Curto-Circuitos no Enrolamento de Armadura . . . . .	96
6.7	Considerações Finais do Capítulo . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Conclusão e Propostas de Continuidade da Pesquisa</b>	<b>99</b>
<b>A</b>	<b>Estudo de forma de onda com Assimetria</b>	<b>103</b>
<b>B</b>	<b>Medição de fluxo no entreferro para condições de operação com e sem defeito</b>	<b>115</b>
<b>C</b>	<b>Efeitos da vibração mecânica na medição de campos externos</b>	<b>119</b>
<b>D</b>	<b>Testes de campo em unidades geradoras de grande porte</b>	<b>121</b>



## LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CC	Corrente Contínua
cv	cavalo-vapor
EFCAD	<i>Electromagnetic Field Computer Aided Design</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GRUCAD	Grupo de Conceção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
HB	<i>Healthy and Balanced</i>
HU	<i>Healthy and Unbalanced</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LA	Lado do Acionamento
LOA	Lado Oposto ao Acionamento
LC	Indutor-Capacitor
MIT	Motor de indução trifásico
MEF	Método dos Elementos Finitos
MS	Máquina síncrona
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
rpm	revoluções por minuto
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UPF	<i>Unity Power Factor</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$b$	Amplitude mínima de um sinal	[pu]
$B$	Amplitude máxima de um sinal	[pu]
$b_{TAN}$	Componente de campo magnético tangencial à carcaça da máquina elétrica	[T]
$b_{TRA}$	Componente de campo magnético transversal à carcaça da máquina elétrica	[T]
$b_{NOR}$	Componente de campo magnético normal à carcaça da máquina elétrica	[T]
$b_Z$	Componente de campo magnético axial da máquina elétrica	[T]
$dB$	decibel	adimensional
$D_e$	Diâmetro externo de uma bobina-sonda	[m]
$D_i$	Diâmetro interno de uma bobina-sonda	[m]
$\varepsilon$	Erro relativo	adimensional
$f$	Frequência elétrica	[Hz]
$f_1$	Frequência da fundamental do sinal	[Hz]
$f_b$	Componente de frequência indicativa de falta por barras rompidas em MITs	[Hz]
$f_\varepsilon$	Componente de frequência indicativa de excentricidades em MITs	[Hz]
$f_d$	Componente de frequência indicativa de falta em MS	[Hz]
$g_\varepsilon$	Constante	adimensional
$\vec{H}$	Vetor campo magnético	[A/m]
$i$	Corrente elétrica	[A]
$k$	Constante	adimensional
$l$	Comprimento espacial	[m]
$n$	Número natural	adimensional
$N$	Número de espiras de uma bobina	adimensional
$N$	Número de amostras digitais de um sinal	adimensional
$N_2$	Número de ranhuras do rotor de um MIT	adimensional

$p$	Número de pares de polos em uma máquina elétrica	adimensional
$s$	Escorregamento	adimensional
$S$	Seção transversal de uma espira	$[m^2]$
$S_m$	Área média de uma bobina-sonda	$[m^2]$
$r$	Raio de uma bobina	$[m]$
$t$	Tempo	$[s]$
$T_e$	Período elétrico	$[s]$
$T_m$	Período mecânico	$[s]$
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo	$[H/m]$
$v$	Diferença de potencial elétrico	$[V]$
$\omega_e$	Frequência angular elétrica	$[rad/s]$
$\omega_m$	Frequência angular mecânica	$[rad/s]$



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Posicionamento do Problema e Motivação da Pesquisa

A detecção, a avaliação e o gerenciamento de falhas em motores e geradores elétricos têm importância principalmente nos setores industriais e de produção de energia. Nestes nichos econômicos estas máquinas elétricas geralmente são de média ou grande potência (comumente classificados entre maiores que 50 kW e maiores que 500 kW, respectivamente), e fazem parte de linhas de produção industrial ou da alimentação de cargas que exigem alta confiabilidade. Uma falta geralmente provoca queda de eficiência e, num caso mais grave, uma parada não programada devido a falhas elétricas ou mecânicas que podem causar prejuízos técnicos e financeiros de grande monta. De modo geral, estas faltas ocorrem por operação e manutenção inadequadas, envelhecimento de seus componentes elétricos e mecânicos, ou mesmo especificações incorretas para a aplicação.

A busca por sistemas cada vez mais confiáveis gerou, nos últimos anos, intensa pesquisa científica para desenvolver e aprimorar métodos de detecção de faltas incipientes em máquinas elétricas, de maneira a não mais depender apenas do sistema de proteção para uma falha já consumada, mas com vistas a uma manutenção programada eficiente e com resultados de médio ou longo prazo. É evidente, cabe ressaltar, que sistemas de proteção através do monitoramento das variáveis da máquina (correntes, tensões, temperaturas, vibração etc.) são essenciais para que se possa assegurar ações preventivas e assim evitar ou minimizar falhas catastróficas. No entanto, como bem argumentam

Tavner et al. [1], a proteção de um equipamento é, na grande maioria das aplicações, projetada para basicamente atuar apenas após a falha ter ocorrido. Como os autores citam "...a proteção é a ambulância aos pés do penhasco, ao invés de a cerca no cume". Esta é uma razão primordial pela qual os sistemas de proteção preditiva são cada vez mais discutidos e aplicados na indústria. É importante lembrar, no entanto, que um monitoramento eficaz da condição de operação de um motor ou gerador elétrico não se aplica somente à própria máquina, mas sim ao processo no qual está inserida (condição da carga, condição da máquina primária, variáveis ambientais, entre outras). O monitoramento visando a manutenção preditiva deve ser planejado de modo a reconhecer possíveis faltas em estágios iniciais, na forma mais abrangente possível. Assim, há uma maior liberdade para que equipes de manutenção realizem paradas programadas de maneira mais conveniente, resultando em um tempo sem produção mais breve e com menores prejuízos associados.

Em um interessante estudo prático, Severo et al. [2] mostram que algumas vezes programas de manutenção preventiva podem não ser suficientes para minimizar a probabilidade de falhas a uma taxa razoável. Por isso, sistemas de manutenção preditiva são ferramentas essenciais à coordenação de operação de uma máquina elétrica, facilitando em muito o diagnóstico e prognóstico de faltas incipientes. Outra grande vantagem da implantação de sistemas de manutenção preditiva é a obtenção de benefícios, como redução do valor pago na negociação de seguros para as máquinas elétricas e, por vezes, da própria instalação. Na visão dos autores [2], sistemas de detecção de faltas em seu estágio inicial levam à minimização do risco de falhas severas, ao aumento da segurança da instalação e ao prolongamento da vida útil do equipamento.

Algumas das mais importantes ferramentas proporcionadas pela manutenção preditiva, e comumente citadas na literatura da área, são: a possibilidade de acompanhamento de tendências na evolução de faltas incipientes, a avaliação do intervalo de tempo para alcance de valores críticos, e, estatisticamente, a estimação do tempo de vida restante do componente/equipamento. No que se refere às máquinas elétricas e à manutenção preventiva associada, Tavner et al. [1] propõem que o monitoramento abranja: o conhecimento do princípio de funcionamento no regime em que está inserida; as maneiras de como ela possa falhar; a análise de sinais elétricos, magnéticos, mecânicos e químicos. Para tanto, acrescentam a necessidade do desenvolvimento de um sistema de instrumentação e processamento eficaz dos dados obtidos no

monitoramento das máquinas.

Na literatura científica e no mercado especializado são inúmeros os métodos propostos para detecção e avaliação de faltas incipientes em motores e geradores elétricos que abarcam a visão exposta no parágrafo anterior, como será apresentado no Capítulo 2. A pesquisa sobre o Estado da Arte revela que nos últimos anos muitos sensores, métodos de análise e instrumentos foram desenvolvidos, com capacidades e aplicabilidades diversas, no intuito de fornecer ferramentas cada vez mais especializadas para o monitoramento da condição de operação de máquinas elétricas. De forma breve, pode-se dizer que a maioria das abordagens de avaliação de faltas consiste em empregar um sensor que forneça uma grandeza elétrica relativa a uma variável de interesse da máquina (correntes ou temperaturas, por exemplo). Juntamente com aparatos de tratamento de sinais e aquisição de dados, os sistemas formados possibilitam a criação de bancos de dados que relacionam um padrão do sinal elétrico a determinado tipo de defeito.

As principais grandezas monitoradas nas máquinas elétricas para a avaliação de faltas incipientes são: temperatura (global da máquina ou local, por elemento), componentes químicos (gases ou subcomponentes formados pelo envelhecimento ou degradação de isolantes e óleos lubrificantes), vibração, ruído acústico, corrente elétrica, fluxo magnético (de entreferro e externo) e descargas parciais [3]. Embora vários autores avaliem cada uma das técnicas por meio de vantagens e desvantagens, procurando destacar alguma sobre as outras, este trabalho prefere a vertente em que todas são vistas como complementares. A utilização de várias grandezas na monitoração de máquinas importantes proporciona melhores tomadas de decisão e tem um custo marginal, frente ao valor da máquina, e de uma eventual parada de produção por falha. Um bom exemplo que ilustra este ponto de vista é apresentado em [4], que descreve as causas e os efeitos da contaminação da parte interna da máquina por partículas líquidas ou sólidas: sabe-se que aproximadamente metade das falhas em máquinas elétricas têm relação com defeitos nos mancais, que podem ser detectadas por medição da temperatura do óleo lubrificante ou, dado o desbalanceamento geralmente correlato, por meio de medição da corrente de alimentação, fluxos magnéticos, vibração ou ruído acústico. Um problema dos mais frequentes verificado em mancais por rolamentos defeituosos é, contudo, o vazamento do óleo lubrificante para o interior do motor ou gerador, que pode se espalhar por várias regiões. A película criada acaba concentrando detritos e umidade sobre os enrolamentos e dutos de ventilação, o que acarreta imediatamente numa perda de eficiência na dissipação

térmica, elevando a temperatura da máquina e acelerando o envelhecimento dos materiais isolantes [4]. Este envelhecimento precoce causa o surgimento de descargas parciais e/ou curto entre espiras, por exemplo. Este tipo de falta pode ser detectado por sensores de campo elétrico ou magnético. Assim, como cada método tem sua própria limitação de sensibilidade, a utilização de várias técnicas de maneira complementar possibilita um monitoramento da condição de operação da máquina com elevado nível de confiança.

Cada tipo de falha envolve uma série de relações causa-efeito, que dependem da própria máquina (tipo, fatores construtivos, método de acionamento) e da aplicação (ambiente da instalação, regime de carga). Uma avaliação prática da condição de um motor ou gerador consiste, portanto, em monitorar uma ou mais variáveis de interesse e comparar o resultado com dados adquiridos previamente e definidos como o estado saudável do equipamento, ou com estimativas obtidas por modelos analíticos ou numéricos. No entanto, como cada máquina elétrica é, em última análise, única e está submetida a regimes de operação igualmente particulares, a condição ideal de avaliação visando a manutenção preventiva é a obtenção de um histórico para cada variável monitorada, onde se possa verificar tendências de evolução, de forma similar a um prontuário médico. Um exemplo comum que ilustra esta perspectiva é a análise de vibrações de um motor. Caso haja excentricidades rotóricas e a máquina tenha problemas de fixação ou de acoplamento com a carga, modos de vibração únicos podem ocorrer, acrescentando ou mascarando componentes de frequência previstas em modelos ou em estudos controlados.

Neste contexto, este trabalho de tese desenvolve um sistema para detectar e avaliar faltas em motores de indução trifásicos (MITs) e, principalmente, em máquinas síncronas (MSs) através da medição do fluxo magnético externo a estas máquinas. Duas características importantes foram consideradas para escolha da variável a ser monitorada (fluxo magnético externo) e do sensor empregado (bobinas-sonda). A primeira é a possibilidade de avaliar a máquina com um método não invasivo. A segunda é a facilidade de construção destes sensores aliado à experiência do Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) no tratamento de sinais de baixa amplitude. Conforme será discutido adiante, esta abordagem permite detectar uma ampla gama de defeitos/condições de operação e pode ser empregada virtualmente em qualquer motor ou gerador. O conceito envolvido na estratégia metodológica de avaliação consiste na observação de modificações espectrais sofridas pelos fluxos magnéticos de uma máquina

girante como consequência de uma falta (uma barra de gaiola interrompida, curto-circuitos de enrolamentos, excentricidades etc.).

## 1.2 Objetivos e Contribuições da Tese

O objetivo geral deste trabalho de tese foi desenvolver um sistema de medição e análise que utilize sensores de campo magnético por indução e permita a detecção de faltas incipientes em máquinas elétricas por meio da avaliação do espectro de frequências do seu fluxo magnético externo.

Os objetivos específicos foram:

- i) Projetar e aprimorar um sistema (equipamento) de medição de campo magnético portátil com emprego de sensores tipo bobinas-sonda;
- ii) Avaliar o desempenho do equipamento de medição de campo desenvolvido na detecção de barras rompidas e excentricidades em motores de indução trifásicos de pequeno porte, acionados em bancadas disponíveis ao GRUCAD;
- iii) Desenvolver uma bancada de testes em máquinas síncronas com possibilidade de introdução controlada de diversos tipos de faltas elétricas e mecânicas;
- iv) Avaliar o desempenho do equipamento para detecção de faltas controladas em máquinas síncronas em laboratório, empregando um único sensor;
- v) Utilizar o sistema de medição desenvolvido para avaliar a viabilidade de detecção em campo de faltas em máquinas síncronas de grande porte.

Após o desenvolvimento do equipamento de medição de campos magnéticos, testes iniciais foram realizados em dois momentos: o primeiro deles com uma bancada de ensaios equipada com um sistema de freio de Foucault, disponível no GRUCAD para ensaios de detecção de barras rompidas em MITs; em seguida foram realizados experimentos para detecção de excentricidades de um MIT em uma bancada especial disponibilizada por um fabricante nacional de motores. Embora estes estudos iniciais não permitissem contribuir significativamente para o Estado da Arte, eles viabilizaram os primeiros testes da instrumentação

e do método de detecção de faltas através do campo magnético externo. Na segunda etapa deste trabalho, com o desenvolvimento de uma nova bancada e de testes controlados e de campo, o estudo focado em máquinas síncronas possibilitou novas abordagens que possuem contribuições a esta área de estudo, tanto sob o aspecto técnico quanto metodológico:

- i) O sistema portátil de medição de campo magnético desenvolvido apresentou excelente resposta técnica, à semelhança de equipamentos comerciais, tanto para testes laboratoriais quanto em campo. Destaca-se o reduzido erro aferido de leitura,  $\varepsilon < 5\%$  para  $1,25 \mu\text{T}$  @5 Hz (Capítulo 4), e sua imunidade eletromagnética, que permitiu o uso sem interferências em ambientes industriais (Apêndice D). O protótipo também foi preparado para receber sinais de outros tipos de sensores, como bobinas de Rogowski, tornando-o bastante versátil para diversas outras aplicações (ver testes de medições de corrente no Apêndice D). Conquanto existam sistemas comerciais semelhantes, considera-se que alguns dos aspectos aqui apresentados forneçam importantes informações técnicas comumente pouco acessíveis;
- ii) Também projetada e construída durante este trabalho, a bancada de ensaios na qual podem ser impostos diversos defeitos mecânicos e/ou elétricos para simulação de faltas em máquinas síncronas, se mostrou uma poderosa ferramenta para estudos na área de manutenção preditiva (ver Capítulo 5). Em virtude de sua versatilidade e facilidade de acionamento, várias condições de operação podem ser implementadas e seus dados utilizados para validação de modelos analíticos e numéricos. O equipamento também pode ser utilizado como um bom instrumento didático no ensino de uma variedade de assuntos correlatos à máquinas síncronas, uma vez que o mesmo está disponível ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC em seu Laboratório de Ensino de Máquinas e Acionamentos;
- iii) A metodologia de detecção de faltas com apenas um sensor de campo magnético externo obteve êxito nos testes controlados em laboratório, com resultados confiáveis e bastante simples de obter. Pela medição e análise do campo tangencial à carcaça das máquinas com defeito foi possível identificar diferentes assinaturas do campo magnético para cada situação, como apresentado em detalhes no Capítulo 6.
- iv) Por fim, o estudo analítico de formas de onda assimétricas produ-

zidas por defeitos apresenta uma forma alternativa para explicar sua composição espectral ao considerar o sinal no domínio do tempo como uma composição de funções que dependem tanto do período elétrico quanto do período mecânico de uma máquina síncrona, como exposto no Capítulo 3.

## 1.3 Estrutura de Apresentação do Trabalho

Além da contextualização dos primeiros parágrafos deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 procura-se expor uma visão mais abrangente sobre do Estado da Arte na detecção de faltas em máquinas elétricas através do campo magnético externo. São discutidos os métodos de avaliação das principais faltas em motores de indução trifásicos e em máquinas síncronas, com mais atenção no exame de sinais no domínio da frequência.

No Capítulo 3 é apresentada uma abordagem através de Série de Fourier em que se analisa uma forma de onda com distorções no domínio do tempo e da frequência, procurando elucidar determinados comportamentos associados às grandezas elétricas de máquinas síncronas sob falta. São apresentadas comparações de resultados entre análises analíticas, numéricas e experimentais.

Em seguida são discutidos no Capítulo 4 o aparato experimental desenvolvido para a medição de campos magnéticos dispersos e as técnicas de análise de dados empregadas na tarefa de indicar a condição de operação da máquina elétrica sob o contexto deste trabalho. Também são discutidos os testes pilotos feitos com as primeiras versões de hardware e software do sistema protótipo.

O Capítulo 5 expõe as características técnicas de uma bancada para simulação de defeitos em geradores síncronos, construída especialmente para a validação do sistema de detecção de faltas desenvolvido neste trabalho.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados de medições e análises realizadas com o equipamento supracitado, mostrando que, com a metodologia proposta é possível identificar várias faltas em algumas máquinas ou estimar sua condição de operação com base nos métodos discutidos nos capítulos 2 e 3.

Por fim, o Capítulo 7 conclui o texto com uma revisão dos principais resultados obtidos e propõe ações e linhas de estudo para a continuidade da pesquisa nesta área.

Há ainda, contudo, na forma de apêndices, desenvolvimentos e resultados com dados não totalmente analisados que visam dar subsídios

às discussões mais pormenorizadas do texto principal, porém com sólido potencial para proporcionar avanços nestas pesquisas.



## Capítulo 2

# Avaliação de Faltas em Máquinas Elétricas pelo Campo Magnético Externo

Neste trabalho de tese procurou-se desenvolver uma metodologia de detecção de faltas que possa ser aplicada tanto em motores de indução trifásicos quanto em máquinas síncronas. Portanto, para melhor contextualizar esta pesquisa no Estado da Arte, serão apresentadas ao longo deste capítulo as principais discussões encontradas na literatura da área para estas duas classes de máquinas elétricas.

Uma revisão bibliográfica acerca do estudo do campo magnético externo à carcaça de motores e geradores mostra que o mesmo vem sendo discutido, de forma mais frequente, desde a década de 1970. Alguns dos primeiros trabalhos relatam medições e simulações numéricas de campos no entorno de máquinas de pequena e média potência [5] [6] [7] [8] [9]. Boa parte das discussões procura entender o comportamento do campo em algumas regiões das máquinas, sua parcela de contribuição ao fluxo externo e, por conseguinte, suas ordens de grandeza, com o objetivo principal de avaliar sua influência sobre os conversores estáticos de acionamento, eletrônica embarcada e a problemas relativos à exposição humana. Mais recentemente alguns autores [10] [11] [12] [13] continuaram a estudar o assunto com técnicas mais modernas de medições e simulações numéricas, ainda sob o mesmo enfoque anterior, enquanto outros realizaram pesquisas sob a ótica da Compatibilidade Eletromagnética em baixas e altas frequências [14] [15].

A utilização do campo magnético como forma de detectar faltas em geradores síncronos surgiu também nos anos 1970. Ao que se pode apurar, os primeiros trabalhos nesta área foram feitos pelos engenheiros da empresa inglesa NEI Parsons (hoje Siemens), Dr. A. Anderson [16] e Dr. J. Wood [17], concomitante com pesquisas na empresa americana General Electric através do engenheiro D. R. Albright [18]. Nestes trabalhos os autores buscavam apresentar ferramentas para os problemas da época com a instalação de geradores com potências cada vez maiores, que invariavelmente sofriam com sobreaquecimentos causados por curto-circuitos. Estes estudos buscavam detectar, principalmente, curtos entre espiras através da avaliação dos campos magnéticos no entreferro e no entorno do núcleo e dos enrolamentos do estator. Vários trabalhos mais recentes continuam desenvolvendo pesquisas com esta metodologia, como [19] [20] [21].

Para os motores de indução, o emprego da análise de campo magnético na detecção de faltas (barras rompidas e curto entre espiras do estator) teve início com os trabalhos do professor J. Penman, da Universidade de Aberdeen, na Escócia [22] [23], e com o Dr. G. Kliman, da empresa norte-americana General Electric [24], na década de 1980, já utilizando o fluxo externo. Este método ganhou mais visibilidade nos últimos dez anos, principalmente por conta de trabalhos como os de M. Negrea [25], V. Kokko [26], C. Cunha [27], C. Dias [28], J. Sprooten [29], P. Bui [30], G. Pole [31], G. Capollino [32] [33] e R. Romary [34] [35] [36], além de equipamentos comerciais como o *CSI 2130 Machinery Health Analyzer*, da empresa norte-americana Emerson [37].

Como em todo desenvolvimento tecnológico, há vários pedidos de propriedade intelectual resguardando determinadas funcionalidades e metodologias na área da avaliação de faltas em máquinas elétricas. Nenhum dos documentos consultados é, no entanto, mais abrangente do que o Pedido de Patente depositado em 2009 pela empresa norte-americana General Electric [38]. Nesta solicitação os inventores reivindicam que o sistema de detecção e avaliação de faltas criado: pode ser utilizado em qualquer tipo de máquina elétrica; pode ser empregado para detectar qualquer tipo de falta; que os sensores utilizados podem ser invasivos ou não-invasivos; que o sistema pode empregar qualquer tipo de sensor de campo magnético; que, além de sensores de campo magnético, podem ser utilizados também sensores de campo elétrico e eletromagnético; que o método de diagnóstico é realizado, ao menos em parte, por meio da comparação dos valores de campo medido com valores de referência obtidos por simulações, por comparação com outra máquina similar ou por comparação com o histórico da própria

máquina em avaliação; que o sistema computacional de aquisição e tratamento de dados pode assumir virtualmente qualquer base tecnológica de processamento de dados; que pode empregar um ou mais sensores para medir o campo magnético (se for o caso) no entorno da máquina elétrica afastados da mesma por qualquer distância  $d$ ; e utiliza, além de valores da grandeza medida, a decomposição harmônica desta grandeza para comparações com valores pré-determinados.

Deste levantamento de pesquisas e aplicações comerciais ressalta-se por fim que, a maioria dos trabalhos busca encontrar no espectro do campo medido componentes de frequência singulares a algum defeito, como em [36], ainda que alguns estudos utilizem os parâmetros do campo magnético no domínio do tempo como ferramenta para detectar faltas, como em [18]. A ampla utilização de ferramentas de avaliação no domínio da frequência se deve ao fato de que as assimetrias elétricas e mecânicas que ocorrem nas partes ativas das máquinas girantes em função das faltas acabam por causar direta ou indiretamente distorções em suas correntes e fluxos, que podem ser mais facilmente acompanhadas por meio de históricos das modificações no conteúdo espectral. Frequentemente, estes registros são chamados de assinaturas magnéticas da máquina. Assim, optando por esta abordagem, as próximas seções deste texto buscam apresentar esta metodologia como base para o desenvolvimento do aparato experimental de detecção de faltas desenvolvido nesta pesquisa.

## 2.1 O Campo Magnético Externo

Diversos trabalhos têm buscado estimar numérica e experimentalmente o campo externo a uma máquina elétrica, com o objetivo de mostrar sua viabilidade na detecção de faltas diversas [39] [40] [41] [26] [29]<sup>1</sup>. Alguns autores apresentam uma abordagem mais qualitativa, procurando expor como é a distribuição espacial destes campos e qual a influência das faltas no comportamento desta grandeza. Por exemplo, em 1999 Thomson [42] propôs um modelo de distribuição do campo magnético externo de uma máquina elétrica, mostrado na Figura 2.1. Embora simples, o esquema permite visualizar com boa aproximação as regiões de maior concentração de fluxo, internas e externas.

Os detalhes construtivos de cada máquina elétrica, e o tipo da instalação, certamente alteram a distribuição dos campos. Porém, este mo-

---

<sup>1</sup>Optou-se neste texto, quando conveniente para o leitor, citar as referências em ordem de importância para o assunto em questão.

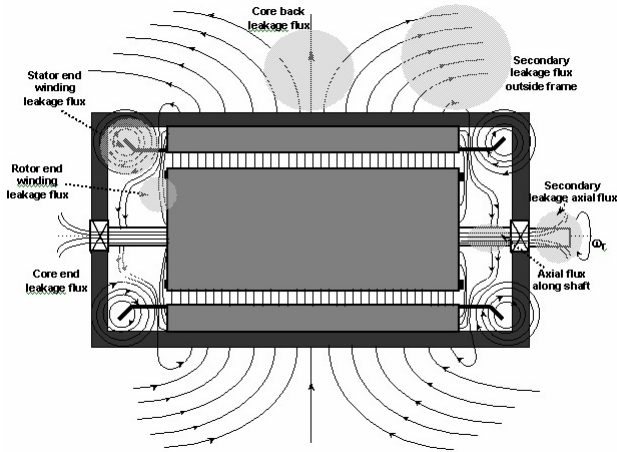


Figura 2.1: Modelo esquemático proposto por Thomson da distribuição de fluxos em uma máquina elétrica [42].

delo evidencia que uma montagem prática de sensoriamento do campo magnético externo ao motor/gerador deve ponderar qual a melhor região a ser observada.

De maneira mais aplicada, Vitek et al. [43] compararam valores de campo magnético na parte externa de um motor de indução trifásico de 1,5 kW, 4 polos e carcaça de alumínio, obtidos por simulação numérica (através do software *opensource* FEMM) e por medições na máquina real. A Figura 2.2 mostra a carta de campos obtida para um caso de simulação estática, enquanto a Figura 2.3 mostra a comparação dos valores obtidos pelos dois métodos de análise.

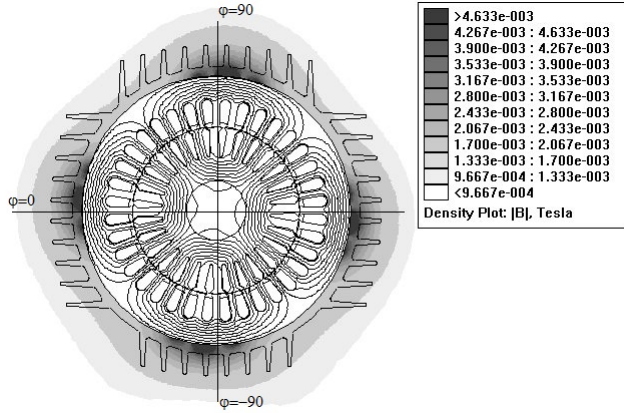


Figura 2.2: Análise estática do campo magnético externo à carcaça do motor [43].

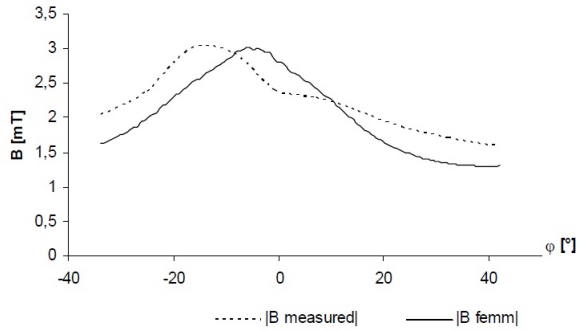


Figura 2.3: Distribuição do fluxo magnético sobre a carcaça do motor [43].

Apesar das simplificações utilizadas pela simulação 2D, é notável a concordância dos resultados obtidos pelos autores. A defasagem espacial entre as amplitudes obtidas numericamente e por medição, apesar de não comentada no texto, supõe-se, pode ser efeito de deslocamentos

construtivos dos enrolamentos na máquina real. Simulações de campo para um caso dinâmico (com alimentação trifásica) também foram realizadas, obtendo-se valores de campo com uma ordem de grandeza menor ao caso estático. Porém, os autores não apresentam comparações com medições no motor real.

Com o objetivo de detectar faltas em motores de indução de grande potência, Fireteanu et al. [44] realizaram várias simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos 2D (MEF 2D) considerando defeitos, obtendo como resultado a forma de onda do fluxo magnético estimada por um sensor na sua região externa. As especificações do motor são 500 kW, 6000 V, 50 Hz, 743 rpm, carcaça em aço de 16 mm e diâmetro total da máquina 1006 mm. Foram simulados os casos para o motor sem defeito, com uma barra quebrada e com excentricidade dinâmica, conforme mostram as cartas de campo da Figura 2.4.

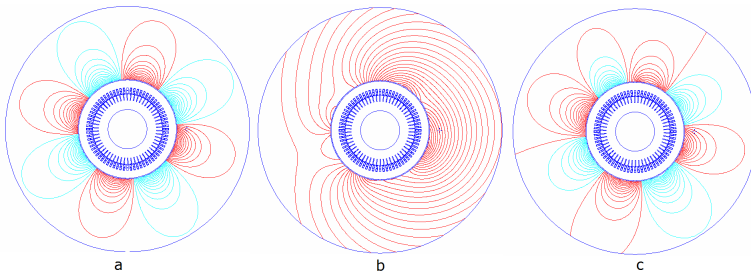


Figura 2.4: Linhas de campo externas ao motor: a- motor saudável, b- com uma barra quebrada, c- com excentricidade dinâmica. [44].

Por meio desta sequência de resultados, nota-se que com a introdução de um defeito a simetria do campo externo desaparece. Observa-se também que as cartas de campo diferem sensivelmente de um caso para outro. A forma de onda obtida nos sensores, em virtude desta distribuição irregular do campo, apresenta diferentes composições espectrais que os autores utilizam para reconhecer padrões do espectro que auxiliem na detecção dos defeitos. Os autores informam ainda que, para estas simulações, devido à atenuação provocada pela carcaça, a amplitude do campo externo é da ordem de nanoteslas.

Em [45], Zidat et al. propõem um modelo mais elaborado de avaliação do fluxo magnético externo à carcaça de um motor trifásico. Neste modelo, apresentado na Figura 2.5, são consideradas duas componentes do campo da máquina elétrica. A primeira componente é axial, nomeada  $\mathbf{b}_Z$ , e a segunda é dita transversal e denominada  $\mathbf{b}_{TRA}$ . Esta última

componente pode ainda ser decomposta em duas projeções,  $\mathbf{b}_{NOR}$  normal à superfície da carcaça, e  $\mathbf{b}_{TAN}$  tangencial à superfície.

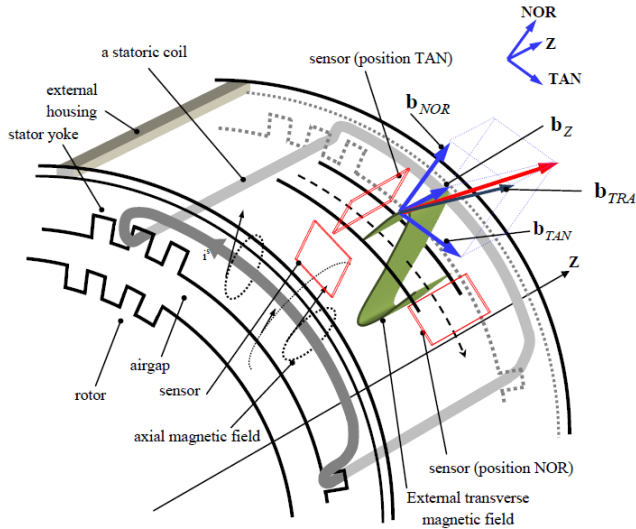


Figura 2.5: Diagrama de separação de componentes do campo magnético externo de um motor [45].

A Figura 2.6 mostra o posicionamento dos sensores em um motor para medir cada uma das componentes. Na Figura 2.7 são mostrados os resultados de medições das mesmas. O motor utilizado era trifásico, de 11 kW e 4 polos.

Com esta abordagem, e através de uma longa série de testes experimentais e de simulações pelo MEF 3D (utilizando o software de cálculo de campos Opera), o trabalho mostra que: *i*) a componente  $\mathbf{b}_{TRA}$  está relacionada com o campo no entreferro e, portanto, estão também suas duas parcelas. A componente  $\mathbf{b}_{NOR}$  sofre influência do campo axial provocado pela cabeça-de-bobina, enquanto que a componente  $\mathbf{b}_{TAN}$ , em virtude de sua direção, não é afetada; *ii*) a componente  $\mathbf{b}_Z$  se deve ao campo provocado pelas correntes que circulam no final dos enrolamentos. Pela Figura 2.7, observa-se que esta componente tem picos de amplitude próximos às partes frontais da máquina e tende a zero aproximadamente no meio da carcaça; *iii*) o comprimento do pacote estatórico, e a distância deste ao final dos enrolamentos, influenciam apenas a componente  $\mathbf{b}_{NOR}$ ; *iv*) a saturação da máquina não modifica

a forma de onda dos fluxos  $\mathbf{b}_{NOR}$  e  $\mathbf{b}_{TAN}$ , apenas suas amplitudes são alteradas;  $\mathbf{v}$ ) ainda com relação a estas duas últimas componentes, as correntes induzidas na carcaça (com condutividade de  $10^6$  S/m) da máquina atenuam em aproximadamente 33% suas amplitudes e as defasam em 30 graus em relação ao campo no entreferro, valores estes obtidos numericamente.

Muito embora os valores de  $\mathbf{b}_{TAN}$  sejam função da carga, o trabalho de Zidat et al. [45] mostra que, para o motor utilizado, esta é a melhor componente para se avaliar uma imagem do fluxo no entreferro. Sua medição deve ser feita no centro do motor. Já para uma imagem da corrente estatórica deve-se medir a componente  $\mathbf{b}_Z$  próxima à parte frontal da máquina.

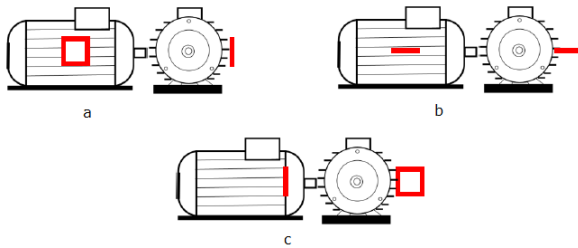


Figura 2.6: Posicionamento dos sensores para medição de a- $\mathbf{b}_{NOR}$ , b- $\mathbf{b}_{TAN}$  e c- $\mathbf{b}_Z$  [45].

O trabalho de M. Negrea [25], comparando a detecção de várias bobinas-sonda em partes internas e externas de um motor, mostra a eficácia do método de detecção de faltas através do campo magnético. A Figura 2.8 ilustra a montagem das bobinas sensoras, sendo a de número 1 enrolada em um dos dentes do motor, a 2 na parte externa cobrindo todo um hemisfério da máquina, a bobina 3 montada na parte externa ao sistema de ventilação e a bobina 4 enrolada em torno do eixo na parte interna do motor. O autor mostra, através de medições e simulações numéricas, que os campos medidos pelas bobinas 3 e 4, por exemplo, são muito mais sensíveis à detecção de curtos entre espiras do estator que as bobinas 1 e 2, corroborando os resultados apresentados por Zidat et al.

Outro resultado interessante diz respeito à detecção de faltas mecânicas, como excentricidades e problemas de rolamento, em que as bobinas dispostas ao longo do eixo da máquina possuem mais sensibilidade do que aquelas que medem principalmente o fluxo axial [25].



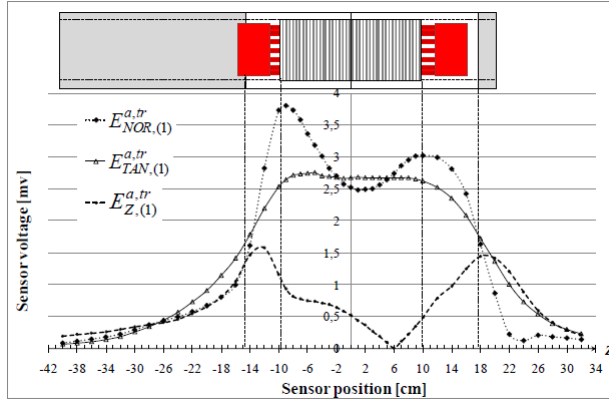


Figura 2.7: Resultados de medições obtidos por Zidat et al. com o motor sem carga [45].

Finalmente, a sumarização dos estudos encontrados na literatura mostra que a utilização do fluxo magnético disperso externamente, frente ao fluxo do entreferro, é uma metodologia eficaz para detecção de faltas em diversas máquinas elétricas. Deixa claro também a importância em se obter uma boa resolução espacial do fluxo externo, uma vez que diferentes parcelas de campos podem estar associadas com informações diversas acerca da condição do equipamento.

## 2.2 Faltas em Motores de Indução Trifásicos

Em motores de indução trifásicos, as faltas mais frequentes são caracterizadas por problemas associados aos mancais (aproximadamente 50% dos casos), curtos entre espiras do estator (em torno de 25%) e problemas relacionados ao rotor (10%), entre diversos outros, como curtos interlaminares, problemas no eixo e de acoplamento com a carga etc. [25]. Contudo, estas estimativas podem variar consideravelmente, uma vez que a ocorrência de cada tipo de falta depende significativamente da aplicação. Neste trabalho de tese é abordada inicialmente a detecção de barras rompidas no rotor e de excentricidades rotóricas, as quais podem estar associadas à operação em sobrecarga e problemas com rolamentos, por exemplo. Desta forma, os parágrafos a seguir descrevem para cada uma das faltas consideradas seus modos de manifestação e

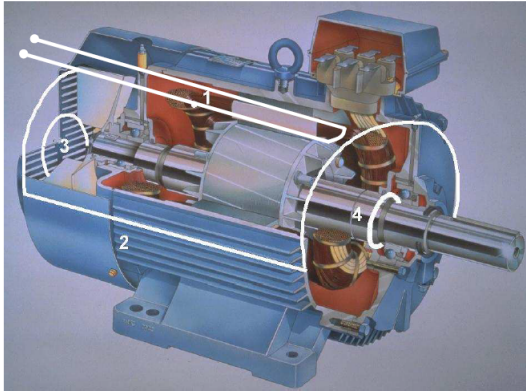


Figura 2.8: Posicionamento de bobinas-sondas internas e externas para avaliação de defeitos [25].

procedimentos adotados para a sua detecção por meio da análise do espectro do campo magnético externo.

O rompimento de barras em motores de indução é provavelmente o tipo de falta mais discutido na literatura. Embora estudos estatísticos apontem que apenas em torno de 10% das faltas em MIT sejam deste tipo [25], seu comportamento simples e bastante característico para vários métodos de detecção certamente contribuíram para a disseminação dos estudos.

Uma das principais causas para o rompimento de barras de rotores em gaiola de motores de indução é a sua operação em sobrecarga, pois correntes excessivas aquecem os condutores que podem fundir ou dessoldar-se do anel de curto-circuito. Outra causa importante é o efeito de pulsação do torque. O rompimento de uma barra, em geral, acarreta o sobreaquecimento das barras adjacentes pela redistribuição das correntes rotóricas, o que acaba por agravar o problema com o passar do tempo.

O processo de surgimento de componentes de frequência laterais à frequência fundamental de alimentação é descrito em [42] [46] [47]. Discute-se que, quando há uma assimetria mecânica ou elétrica, seu efeito se manifesta pela geração de um campo de frequência  $sf_1$  contrário àquele induzido no rotor pelo campo girante, ou seja  $-sf_1$ , onde  $s$  é o escorregamento e  $f_1$  a frequência de alimentação. Este, por sua vez, induz no estator uma componente de valor  $f_1(1-2s)$  Hz. Esta interação acaba por criar uma oscilação de torque na frequência de  $2sf_1$  que gera

mais uma componente nos enrolamentos do estator em  $f_1(1 + 2s)$  Hz. Esta interação entre os campos desbalanceados é cíclica e finalmente leva ao surgimento de uma família de componentes de frequência  $f_b$ , laterais à fundamental, dada por

$$f_b = f_1(1 \pm 2ks) \quad (2.1)$$

onde  $k=1, 2, 3...$  Contudo, quanto maior o valor de  $k$ , menores são as amplitudes de  $f_b$ , fazendo com que, na prática, apenas as componentes em  $f_1(1 \pm 2s)$  sejam avaliadas para detectar este tipo de falta [48]. Vale notar que as componentes  $f_b$  fornecidas pela Equação 2.1 são função do escorregamento  $s$ , e portanto seus valores dependem da carga imposta ao motor.

A avaliação do número de barras rompidas é feita por meio da comparação entre as diferenças relativas de amplitudes das bandas  $f_b$  e a fundamental. Entretanto, a carga imposta ao eixo acaba por também modificar as amplitudes destas componentes harmônicas, e assim se faz necessário levar em consideração seu valor em um acompanhamento a médio/longo prazo da condição de operação da máquina [49] [50] [51].

Um bom exemplo que ilustra estas considerações é dado por Brito et al. em [51]. Utilizando o equipamento comercial *CSI2130* da Emerson Process Management [37] para medir o fluxo externo de um motor, os autores mostram as diferenças de amplitudes das bandas laterais para um rotor saudável através do espectro apresentado na Figura 2.9, e outro com sete barras rompidas na Figura 2.10.

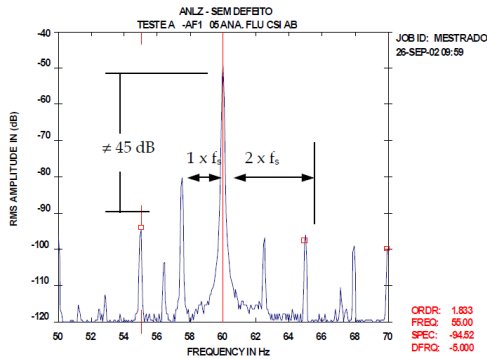


Figura 2.9: Espectro do campo externo do motor sem defeito no estudo de Brito et al. [51].

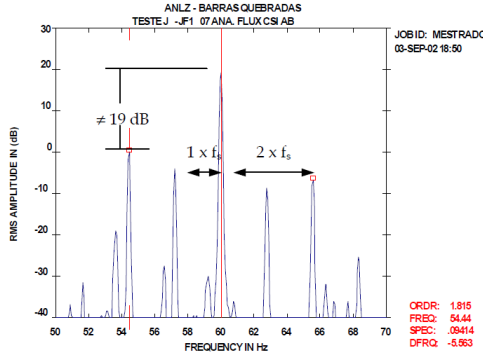


Figura 2.10: Espectro do campo externo do motor com defeito no estudo de Brito et al. [51].

Analisando estes resultados, observa-se que mesmo para o rotor saudável existem componentes do tipo  $f_1(1 \pm 2s)$ . Porém, há uma grande variação na diferença relativa entre as competentes e a fundamental para o rotor defeituoso. Notadamente, a componente em  $f_1(1 - 2s)$  varia de 45 dB para 19 dB em relação à fundamental, demonstrando neste caso, de maneira inequívoca, o estabelecimento da falta.

Por meio do espectro do campo magnético se pode também obter o valor do escorregamento  $s$  da máquina, uma vez que a componente de assimetria do campo  $sf_1$  é parte do conjunto espectral criado pela falta [49] [50], como mostra a Figura 2.11.

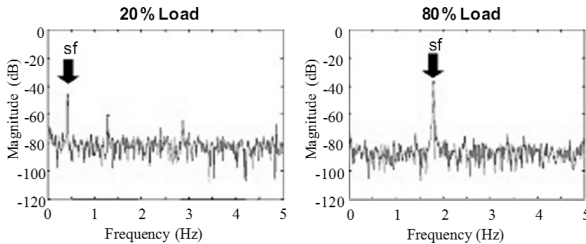


Figura 2.11: Espectro do campo externo do motor para dois valores de carga, mostrando as componentes para determinação do escorregamento  $s$  [49].

Outra falta comumente estudada, a excentricidade de uma máquina elétrica, pode ser definida como a condição em que o entreferro é não

uniforme ao longo do pacote estatórico. Existem dois tipos de excentricidades, chamadas estática e dinâmica, como mostra a Figura 2.12. No caso da excentricidade estática, a posição de menor distância entre rotor e estator é fixa no espaço, não variando no tempo. Já para a excentricidade dinâmica, o centro do rotor não está alinhado com o centro da sua rotação e, portanto, a posição de menor distância rotaciona juntamente com o rotor [52]. Mesmo as máquinas novas possuem certo grau de excentricidade devido às não idealidades nos processos fabris. No entanto, os fabricantes normalmente estipulam uma tolerância máxima para esta imperfeição em função das exigências do mercado ou de normatizações.

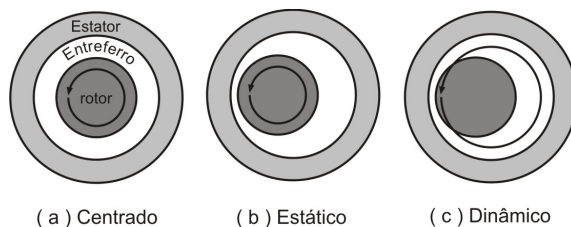


Figura 2.12: Modos de rotação com excentricidades estática e dinâmica [51].

Problemas de excentricidade podem ser causados por desalinhamento na montagem do rotor, eixo defeituoso, falhas nos rolamentos ou mesmo ressonância mecânica. Os efeitos de excentricidades podem ser a vibração mecânica anormal (que pode ser transmitida para a carga ou a partir dela para a máquina), a produção de ruído acústico excessivo, a ovalização do rotor etc. Se não detectado com antecedência, este tipo de falta poderá levar a máquina a uma grave falha, por exemplo, através do fricção entre o rotor e o estator [53] [54] [55] [56] [57].

Uma maneira de detectar os efeitos da excentricidade pode ser através das componentes de frequência da indução geradas pelo desbalanceamento mecânico, como apresentado por alguns autores, em famílias de componentes  $f_\varepsilon$  dadas pela equação

$$f_\varepsilon = f_1 + \frac{(g_\varepsilon N_2 \pm k)}{p} (1 - s) f_1 \quad (2.2)$$

onde  $f_1$  é a frequência de alimentação do motor,  $g_\varepsilon = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ,  $N_2$  é o número de ranhuras do rotor,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $p$  representa o número de par de polos,  $s$  o escorregamento. Para excentricidade estática faz-se  $k=0$ . E utiliza-se  $k=1, 2$  e  $3$  para obter as componentes de primeira,

segunda e terceira ordens para excentricidade dinâmica [52].

Embora determinados modelos possam ajudar a prever algumas das componentes de frequência geradas por desbalanceamentos, como no caso da Equação 2.2, o estudo das faltas por excentricidades é um dos mais complexos no universo da avaliação de condição de operação nas máquinas elétricas, sendo difícil desenvolver um estudo mais completo para a grande quantidade de modos de vibração possíveis citados anteriormente. Um exemplo é apresentado por Tavner em [58]. A Figura 2.13 mostra o espectro da corrente de um motor de indução em uma instalação industrial. Ainda que não haja componentes indicando o rompimento de barras, dois pares de componentes laterais à fundamental aparecem. Segundo o autor, a caixa de engrenagens que acopla o eixo da máquina à carga possuía dentes quebrados, gerando portanto modos de vibração difíceis de modelar, mas que podem ser observados com técnicas de comparação de assinaturas.

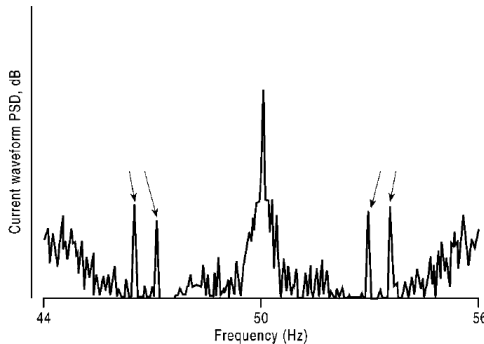


Figura 2.13: Espectro da corrente de alimentação em um motor de indução com falha no acoplamento eixo-carga [58].

## 2.3 Faltas em Máquinas Síncronas

Segundo [59] e [19], as principais causas para o surgimento de faltas em máquinas síncronas ocorrem por contaminação por partículas sólidas ou umidade, resfriamento insuficiente, relés de proteção com acionamentos inadequados, desgaste de isolantes por envelhecimento ou vibração excessiva, corrosão de materiais isolantes pelo efeito corona, problemas de fabricação ou manuseio inadequado durante instalação e operação.

Comparativamente aos estudos sobre motores de indução, a detecção de faltas por meio do fluxo magnético (interno e externo) em má-

quinas síncronas tem sido pouco abordada na literatura. Após consulta a diversas bases de dados, poucos foram os trabalhos relevantes encontrados. Ainda assim, e embora o método da avaliação de faltas através da medição do fluxo no entreferro venha sendo discutido desde a década de 1970 [18] [17] [60] [61] [62], o assunto gerou nos últimos anos algumas pesquisas interessantes [63] [21] [64], e equipamentos de mercado bastante difundidos [65] [20]. Parte destes trabalhos propõem metodologias de detecção de faltas através da análise do espectro do campo magnético, de modo semelhante ao que é feito para as máquinas assíncronas. Entretanto, uma descrição do emprego do fluxo magnético efetivamente externo só foi encontrado nas pesquisas de Thailly et al. de 2006 [39] e V. Bui [30] de 2007.

No primeiro deles, Thailly et al. abordam a detecção de defeitos em máquinas síncronas através do campo magnético radial externo, apresentando a detecção de curto-circuitos nos enrolamentos do rotor e do estator, por meio de comparações de amplitudes de componentes de frequências entre a máquina sadia (Figura 2.14) e em condição de falta. Operando como motor, a máquina tem as seguintes características: 50 Hz, 7,5 kVA, 4 polos e 36 ranhuras no estator.

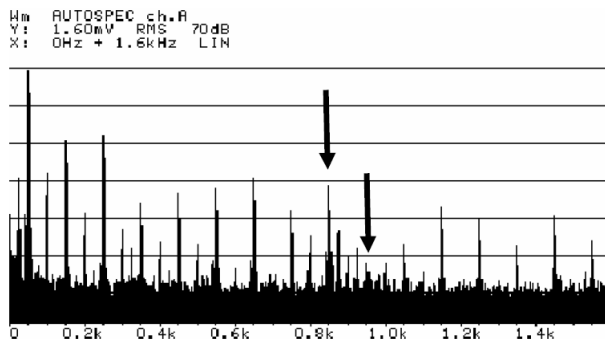


Figura 2.14: Espectro do campo magnético externo para a condição sem faltas no trabalho de Thailly et al. [39].

Para uma falta de curto-circuito no enrolamento estatórico, com a desconexão de uma bobina em uma das fases, apresentam a Figura 2.15, destacando as componentes que mais sofreram alteração em amplitude: 50, 150, 850 e 950 Hz. Embora os autores não comentem, nota-se também a existência de componentes em 25 e 75 Hz mesmo para a máquina sadia, as quais sofrem uma pequena alteração nas amplitudes quando o motor se encontra na condição de falta.

Com o mesmo motor, mas agora ensaiando defeito no enrolamento de campo, com 12,5% das espiras de um polo em curto-circuito, percebe-se na Figura 2.16 um espectro mais denso, em virtude do aumento de amplitude das componentes de frequência entre as harmônicas naturais da máquina, por exemplo 25, 75, 125 Hz etc. Neste caso os autores chamam a atenção para o fato de que a componente de 25 Hz teve uma expressiva variação de amplitude em relação à fundamental.

Desta forma, o trabalho conclui que a avaliação da amplitude das componentes de frequência do campo externo "é promissora como orientação para o diagnóstico, especialmente porque a simplicidade do método o torna muito interessante para os testes realizados em campo e em tempo real".

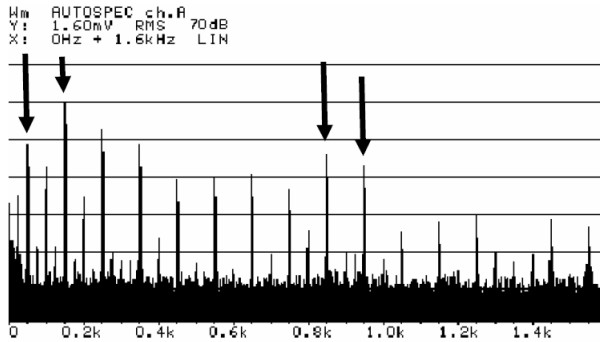


Figura 2.15: Espectro do campo magnético externo para uma falta no enrolamento estatórico [39].



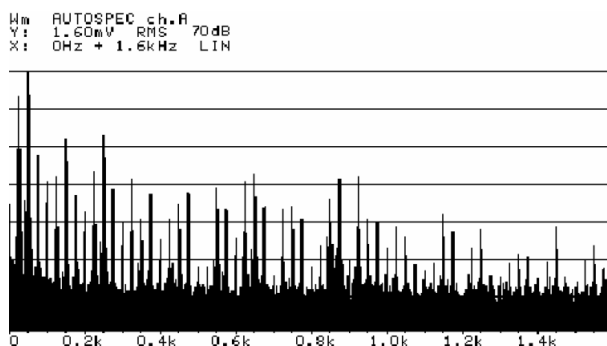


Figura 2.16: Espectro do campo magnético externo para uma falta em 12,5% do enrolamento rotórico [39].

Outra pesquisa que utilizou o campo magnético externo para detecção de defeitos, como citado anteriormente, V. Bui [30] empregou uma máquina síncrona de polos lisos, com entreferro de 4 mm, 30 kVA, 4 polos e velocidade nominal de 1500 rpm. No estudo de Bui optou-se por operar a máquina como gerador com velocidades extra-baixas, no caso 20 rpm, resultando em uma frequência elétrica fundamental de 0,67 Hz. O objetivo deste procedimento foi evitar trabalhar próximo à velocidade nominal, região em que os campos externos sofrem maior atenuação pela carcaça da máquina – com um teste experimental identificou-se que à frequência nominal de 50 Hz há uma atenuação por um fator de aproximadamente 10, em relação à operação em 20 rpm. A medição do campo externo radial (caso *a*) da Figura 2.6) foi realizada por um equipamento comercial que utiliza sensores do tipo fluxgate, do fabricante Bartington Instruments. Nas figuras 2.17 e 2.18 são reproduzidos os resultados de medição do fluxo externo para os dois defeitos experimentais estudados, curto-circuitos no enrolamento de campo e excentricidade estática.

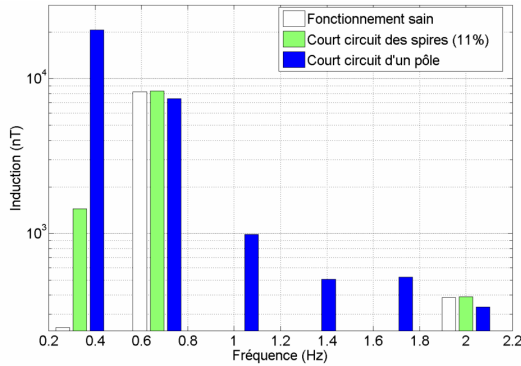


Figura 2.17: Assinaturas magnéticas para o estudo de curto-circuito no enrolamento de campo realizado por V. Bui [30].

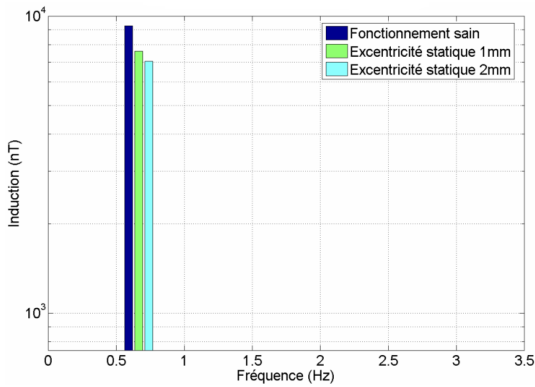


Figura 2.18: Assinaturas magnéticas para o estudo de excentricidade no enrolamento de campo realizado por V. Bui [30].

É possível observar que, da mesma maneira como apresentado por [39], existem variações nas amplitudes das componentes espectrais conforme a falta se estabelece. No caso do estudo de curto-circuitos rotóricos houve um aumento significativo no valor da componente de 0,33 Hz com o agravamento do defeito, e variações de menor intensidade nas demais. No estudo de excentricidade, a medição detectou apenas a

componente fundamental elétrica e uma pequena modificação em sua amplitude para deslocamentos de 25% e 50%.

Um estudo importante neste contexto é o trabalho de Neti et al. [66], em que procuram desenvolver um modelo analítico da indução no entreferro em função da permeância, para máquinas síncronas com assimetrias internas. Neste trabalho os autores concluem que quando há um desbalanceamento interno, mecânico ou elétrico, componentes de frequência  $f_d$ , que obedecem à Equação 2.3, podem ser detectadas na corrente de armadura.

$$f_d = k \frac{f_1}{p} \quad (2.3)$$

Nesta equação,  $f_1$  representa a frequência fundamental elétrica,  $p$  o número de pares de polos e  $k$  um inteiro natural. Com esta relação os autores mostram que, da mesma forma que para uma máquina de indução, assimetrias modificam o conteúdo espectral de uma variável da máquina, neste caso provocando a existência de componentes na região sub-síncrona e inter-harmônica. Por exemplo, para uma máquina de 4 polos operando em 60 Hz, tem-se para  $k=1$  e  $k=3$  componentes laterais à fundamental elétrica em 30 e 90 Hz respectivamente, além das demais sub-harmônicas e inter-harmônicas de maior ordem. Reavaliando os resultados das referências [39] e [30] discutidos anteriormente, nota-se que a Equação 2.3 descreve o comportamento das medições de fluxo externo apresentadas pelos respectivos autores.

Com outro artigo, em [63] Neti e Nandi apresentam vários resultados de simulações e experimentos na detecção de curto-circuitos em espiras do enrolamento estatórico de um motor síncrono de 2 kW, 4 polos, 60 Hz. A abordagem utilizada consiste somente na comparação de amplitudes de algumas componentes do espectro, tanto das correntes de excitação quanto do sinal de um sensor de campo magnético montado no rotor. Resumidamente, os resultados mostraram que as componentes de frequência mais promissoras para detecção de faltas na máquina estudada foram 30, 90 e 150 Hz, e também que desbalanceamentos na tensão de alimentação alteram apenas as componentes harmônicas pares (120, 240, 480 Hz etc.). Os autores concluem ao longo do trabalho que a análise por sensor de campo é mais sensível a faltas de menor intensidade do que a análise pela medição da corrente. Concluem também que as componentes de 90 e 150 Hz são as que sofrem menor influência do regime de carga da máquina e, portanto, podem ser utilizadas com maior confiabilidade na detecção de curto-circuitos estatóricos. Para exemplificar, a Figura 2.19 mostra o estudo de sensibilidade à detecção

da falta pelo sinal do sensor no entreferro, avaliando somente a componente inter-harmônica de 90 Hz. O ensaio foi feito sob carga nominal. Percebe-se que o método é bastante sensível, detectando modificações de amplitude mesmo para apenas uma única espira curto-circuitada.

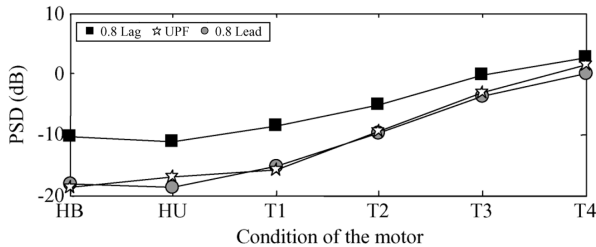


Figura 2.19: Progressão da amplitude da componentes inter-harmônica de 90 Hz medida com a sonda de entreferro, para três padrões de carga: indutivo (0.8 Lag), capacitivo (0.8 Lead) e resistivo (UPF). As siglas HB e HU denotam operação sem defeito, com tensão de alimentação balanceada e desbalanceada, respectivamente. Os pontos T1 a T4 representam a operação com uma a quatro espiras do estator curto-circuitadas [63].

Cabe trazer à discussão do Estado da Arte ainda outros dois trabalhos importantes. Também utilizando bobinas no entreferro, Iamamura [21] realizou um trabalho abrangente sobre a identificação de curto-circuitos rotóricos e excentricidades estáticas e dinâmicas em modelos de turbogeradores de plantas nucleares. Empregando o método da soma dos sinais de dois sensores, distanciados entre si de um passo polar (o gerador possuía 4 polos), foi possível obter assinaturas do campo magnético típicas para os dois tipos de excentricidades. Por exemplo, no caso estático a amplitude da fundamental elétrica aumenta sobremaneira em relação ao caso sadio, enquanto que para o caso de excentricidade dinâmica há um aumento sensível na amplitude das componentes de 25 e 75 Hz. No estudo de curto-circuitos, Iamamura empregou a metodologia proposta por Albright [18] [17], que utiliza a soma do sinal do sensor com sua imagem defasada de 180 graus (para máquina de dois pares de polos) e assim obtém uma forma de onda não nula em caso de defeito. O trabalho também constata, no entanto, que curto-circuitos entre espiras do enrolamento de campo também modificam as componentes laterais à fundamental.

Por fim, uma outra abordagem para medição de fluxo interno, que tem sido utilizada pela empresa canadense Iris Power [67], é a instalação de uma bobina-sonda no entreferro do motor ou gerador para

monitorar o valor de pico do fluxo produzido por cada um dos polos. Calibrada adequadamente com relação a uma posição de referência e à corrente de campo, esta técnica permite não só a detecção de uma falta, uma vez que o fluxo produzido por um polo com curto-circuito terá uma amplitude menor que o dos polos adjacentes, mas também sua localização. A Figura 2.20 apresenta um caso onde um gerador teve espiras de dois de seus polos curto-circuitadas intencionalmente a fim de demonstrar o funcionamento do método.

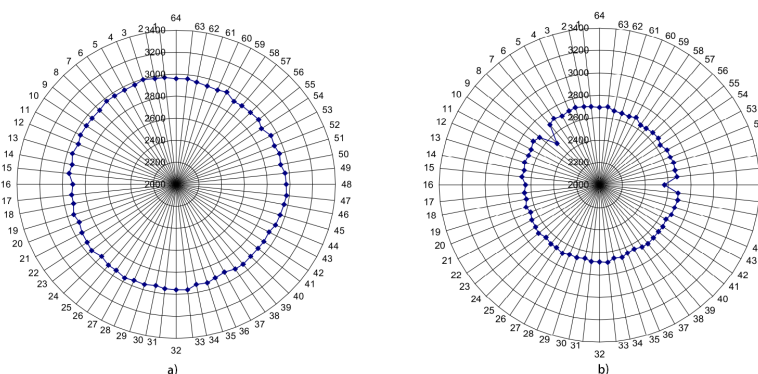


Figura 2.20: Detecção de curto-circuito rotórico em um gerador de 64 polos. No caso a) com rotor saudável e no caso b) com espiras dos polos 8 e 48 em curto-circuito. A escala radial indica o valor de pico médio do fluxo captado pelo sensor [67].

Comparando os dois resultados fica evidente o funcionamento da metodologia, que indicou com precisão os curto-circuitos impostos aos polos 8 e 48, por apresentarem um fluxo sensivelmente menor que aquele dos polos vizinhos.

## 2.4 Considerações Finais do Capítulo

O objetivo deste capítulo foi fazer uma exposição tão abrangente quanto possível do Estado da Arte com consultas às bases de dados disponibilizadas pela UFSC, principalmente às bibliotecas digitais do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), em bancos de patentes e trabalhos de pós-graduação nacionais e internacionais, além de anais de congressos diversos. Nos parágrafos iniciais procurou-se apresentar uma revisão bibliográfica abordando tanto trabalhos acadêmicos

quanto aplicações comerciais, além de incluir um breve resgate histórico dos primeiros trabalhos de pesquisa que utilizam o campo magnético de entreferro e externo na detecção de faltas em motores de indução e em máquinas síncronas.

Pôde-se constatar naquelas discussões que o estudo de faltas em máquinas de indução se encontra mais desenvolvido do que para máquinas síncronas. Aliás, para estas últimas, que são o foco principal desta tese, foram encontradas apenas dois trabalhos similares à presente pesquisa no que se refere à medição do campo magnético externo. No trabalho de Thailly et al. de 2006 [39] foram utilizadas as variações de amplitude das componentes harmônicas da fundamental elétrica, medidas por meio da parcela radial do campo, para observar os efeitos das faltas. Já a pesquisa de V. Bui [30] tratou o tema com uma metodologia que inviabiliza sua utilização em campo, ao propor reduzir a velocidades extra-baixas à rotação da máquina.

Relatou-se também que Neti et al. [66] apresentaram pela primeira vez um modelo de fluxo de entreferro em máquinas síncronas do qual se obtém uma expressão simples para a previsão do surgimento de componentes de frequências nas regiões sub-síncrona e inter-harmônicas quando há assimetrias de distribuição de fluxo no entreferro. Curiosamente, a existência destas componentes sub-harmônicas em máquinas elétricas já é conhecida desde a década de 1920 por meio do trabalho de Q. Graham [68], e ao que parece recebeu pouca atenção da comunidade da área até recentemente.

Com estes estudos da literatura especializada, e tendo em mente o contexto apresentado neste e no capítulo precedente, esta tese aborda o problema focando esforços no monitoramento das componentes sub-harmônicas das máquinas síncronas. Pois, ao contrário da faixa de frequências das harmônicas naturais, esta região do espectro dificilmente é perturbada por sinais espúrios provindos de aparatos eletrônicos ou eletro-mecânicos, mesmo nos ambientes industriais. Estas componentes também têm menor influência das atenuações pelas estruturas ferromagnéticas que compõe as máquinas.

Para confirmar os resultados encontrados na literatura, e testar a hipótese de que as alterações provocadas nas amplitudes das componentes sub-síncronas podem ser detectadas eficazmente por sensores externos do tipo bobina-sonda e em instalações industriais convencionais, esta tese desenvolveu equipamentos de medida e testes controlados que serão expostos nos capítulos 4 a 6. Também é realizado um estudo analítico e numérico sobre a composição espectral do fluxo magnético em máquinas síncronas, quando este sofre alterações assimétricas em

um período de revolução mecânica, conforme será apresentado a seguir no Capítulo 3.





## Capítulo 3

# Estudo da Composição Espectral de Formas de Onda com Assimetria em uma Máquina Síncrona

Existem diversas aproximações para se modelar as variáveis das máquinas elétricas em condição de falta, como algumas das citadas no capítulo anterior. Porém este trabalho apresenta ainda uma outra abordagem ao problema, considerando que uma assimetria na composição do fluxo de entreferro, provocada pelas não idealidades do processo de construção ou por algum defeito elétrico ou mecânico, pode ser descrita e observada como uma modulação em amplitude de suas grandezas estacionárias.

Havendo nas máquinas girantes duas frequências cossenoidais fundamentais, a frequência de rotação mecânica e a frequência elétrica imposta aos enrolamentos estatóricos, se houver uma assimetria na amplitude do fluxo de entreferro em relação a um referencial no estator, esta se verificará na oscilação modulada da grandeza avaliada (corrente, torque ou fluxo externo, por exemplo). Este efeito por sua vez provocará significativa alteração no conteúdo espectral das variáveis da máquina.

Para ilustrar este conceito, considera-se a forma de onda da indução magnética hipotética  $B(t)$ , estimada em um ponto fixo no entreferro de uma máquina síncrona (MS), como mostra a Figura 3.1. De modo a simplificar a exposição, assume-se que a construção da máquina elétrica

é ideal: com enrolamentos perfeitamente distribuídos e simétricos, resultando em uma força magnetomotriz puramente senoidal; entreferro homogêneo; e sendo seus materiais ferromagnéticos isotrópicos e com características lineares. Não são consideradas tampouco efeitos do acoplamento da máquina com cargas elétricas ou mecânicas. Nestas condições, se for imposto um defeito que provoque uma assimetria no fluxo, como por exemplo a diminuição do número de espiras em um polo do rotor, tem-se a distorção visualizada na Figura 3.1, para uma MS de oito polos.

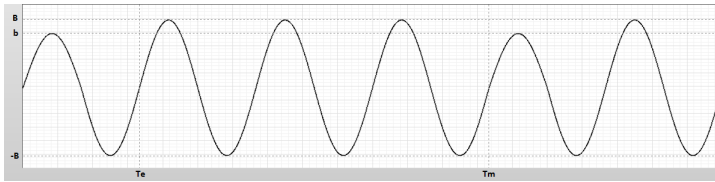


Figura 3.1: Forma de onda periódica da indução avaliada em um ponto fixo do entreferro para uma máquina síncrona ideal de oito polos, com imposição de uma assimetria.

A amplitude da variável tem valor  $B$  para todo o ciclo da revolução mecânica  $T_m$ , com exceção de um semi-ciclo do período elétrico  $T_e$  em que a amplitude é  $b$ .

Considerando entretanto um caso geral, em que a máquina possua  $p$  pares de polos, as relações entre as frequências elétrica  $\omega_e$  e mecânica  $\omega_m$ , e entre os períodos elétrico  $T_e$  e mecânico  $T_m$ , são dadas, respectivamente, pelas conhecidas equações 3.1 e 3.2.

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p} \quad (3.1)$$

$$T_m = pT_e \quad (3.2)$$

Assim, a função que descreve a forma de onda da Figura 3.1 é definida pelas parcelas em 3.3.

$$B(t) = \begin{cases} b \sin(\omega_e t), & 0 \leq t < \frac{T_e}{2} \\ B \sin(\omega_e t), & \frac{T_e}{2} \leq t < pT_e \end{cases} \quad (3.3)$$

Sendo esta uma função periódica definida por partes, pode-se representar a mesma por uma expressão analítica por meio da Série de Fourier, considerando como período fundamental  $T_m$ , ou seja uma revolução mecânica completa. Ao se resolver a série, conforme desen-

volvimento apresentado no Apêndice A, obtêm-se duas expressões para esta indução magnética, uma para o caso especial em que o índice  $k$  dos coeficientes da série é igual ao número de pares de polos  $p$  da máquina ( $k = p$ , Equação 3.4), e outra para os demais casos ( $k \neq p$ , Equação 3.5).

$$B(t) = \frac{(b - B)}{2p\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2p} [b + B(2p - 1)] \text{sen}(k\omega_m t) \right] \quad (3.4)$$

$$B(t) = \frac{(b - B)}{2p\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{p(b - B)}{\pi(p^2 - k^2)} \left( \begin{array}{l} 2\cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \cos(k\omega_m t) + \\ \text{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) \text{sen}(k\omega_m t) \end{array} \right) \right] \quad (3.5)$$

Portanto, quando não houver qualquer assimetria para a variável  $B(t)$  representada na Figura 3.1, ou seja  $b = B$ , a Série 3.5 torna-se nula e a Série 3.4 adquire valor  $B\text{sen}(w_e t)$  – uma função senoidal ideal monotônica com a frequência elétrica nominal da máquina.

No entanto, quando  $b$  é diferente de  $B$ ,  $B(t)$  é definida pela Série 3.4 para  $k = p$ , e pela Série 3.5 para os demais valores de  $k$ . Assim, se houver uma assimetria neste fluxo no entreferro, seu espectro terá uma componente contínua de valor  $\frac{b-B}{2\pi p}$ , e uma série de componentes espectrais harmônicas da frequência mecânica  $\omega_m$ , que são componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas da fundamental elétrica, em concordância com as discussões apresentadas na Seção 2.3.

Cabe aqui uma rápida discussão sobre a terminologia empregada na descrição do conteúdo espectral de grandezas elétricas. O termo harmônica é geralmente empregado para designar um múltiplo natural inteiro da frequência elétrica nominal. Muito menos abordada, mas igualmente importante, é a existência de componentes chamadas sub-harmônicas e inter-harmônicas (múltiplos não inteiros da frequência de referência), que ocorrem em sistemas elétricos, principalmente onde há chaveamentos, alimentação de cargas não lineares etc. [69] [70] [71] [72] [73]. As componentes sub-harmônicas, quando sob enfoque de máquinas elétricas, também são conhecidas por sub-síncronas.

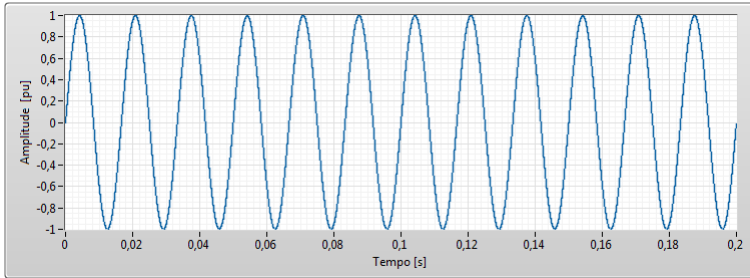
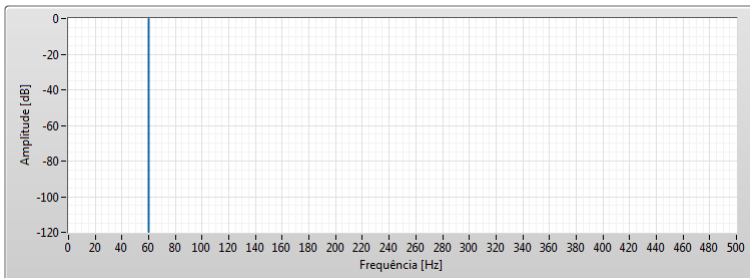
Uma classificação destas regiões do espectro é apresentada pela Força Tarefa para Inter-harmônicas do IEEE, e reproduzida aqui na Tabela 3.1 [74], onde  $f$  representa a designação da componente,  $h$  representa a ordem da componente, e  $f_1$  a frequência fundamental de referência.

Tabela 3.1: Classificação de componentes de frequência.

Designação	Definição
Harmônica	$f = h.f_1, h \in \mathbb{N}^*$
Inter-harmônica	$f \neq h.f_1, h \in \mathbb{N}^*$
Sub-harmônica	$0Hz < f < f_1$

### 3.1 Avaliação do Espectro da Função $B(t)$ pelo Cálculo da Série de Fourier

Implementando computacionalmente as expressões 3.4 e 3.5, pode-se simular diversas condições de assimetria em uma máquina síncrona. Para os propósitos desta tese, supõe-se uma máquina de 8 polos ( $p = 4$ ) e frequência nominal 60 Hz. Assim, quando não existem assimetrias ( $b = B$ ) a forma de onda da função e seu espectro de frequências são apresentados nas figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso sem assimetrias.Figura 3.3: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso sem assimetrias.

Como esperado, na ausência de distorções o espectro computado apresenta apenas a componente de frequência fundamental elétrica de 60 Hz.

Agora, no caso em que  $b \neq B$  o cálculo do espectro das séries mostra que, mesmo para um valor muito pequeno de assimetria entre  $b$  e  $B$ , há o surgimento de componentes harmônicas da frequência de rotação mecânica, como previsto pela expressão 3.5. Na medida em que a assimetria aumenta (ou seja, a severidade da falta cresce), aumenta também a amplitude relativa destas componentes em relação à frequência de maior magnitude, 60 Hz, como pode ser acompanhado pela sequência de resultados a seguir. Foram simuladas condições onde  $b = 0,999B$  (figuras 3.4 e 3.5),  $b = 0,99B$  (figuras 3.6 e 3.7) e  $b = 0,9B$  (figuras 3.8 e 3.9).

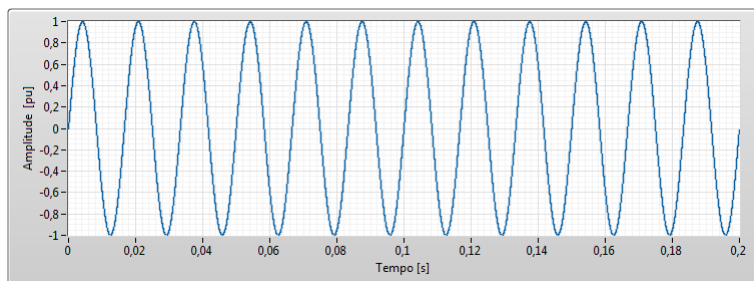


Figura 3.4: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,999B$ .

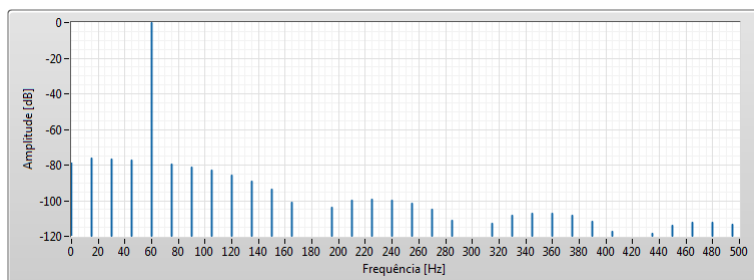


Figura 3.5: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,999B$ .

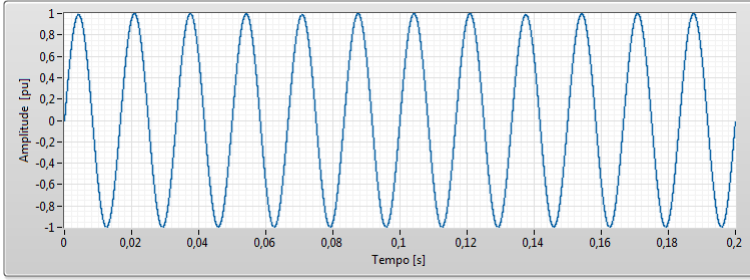


Figura 3.6: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,99B$ .

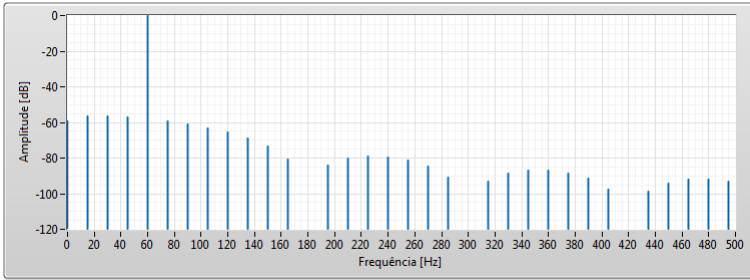


Figura 3.7: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,99B$ .

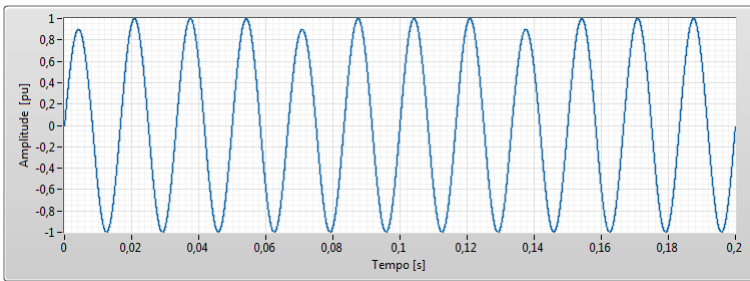


Figura 3.8: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,9B$ .

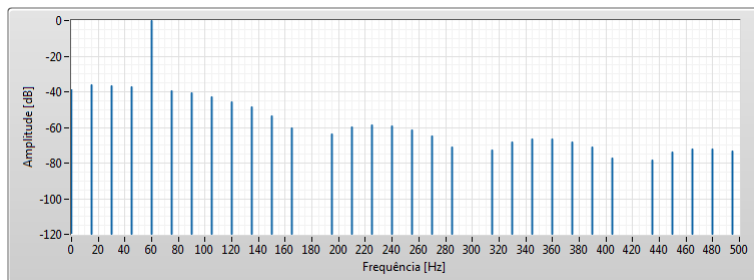


Figura 3.9: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,9B$ .

Desta sequência de dados pode-se concluir primeiramente que mesmo uma máquina síncrona considerada sadia terá a presença das componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas em relação à frequência elétrica nominal, uma vez que sempre haverá pequenas assimetrias e características práticas de fabricação. Além disso, pequenas elevações do nível de assimetria provocam alterações significativas nas amplitudes das componentes harmônicas de frequência mecânica, o que indica uma boa sensibilidade da variável ao fenômeno em estudo.

Mais dois casos com grande assimetria também foram considerados, um com  $b = 0,5B$  (figuras 3.10 e 3.11) e outro com  $b = 0$  (figuras 3.12 e 3.13). Nestes, nota-se que apesar da grande diferença de amplitude imposta a  $b$ , não se observa correspondente alteração nas amplitudes do espectro de  $B(t)$ .

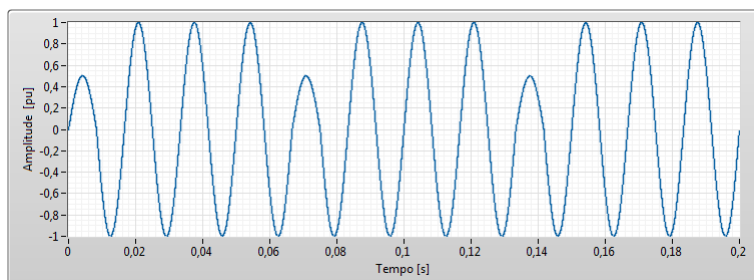


Figura 3.10: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,5B$ .

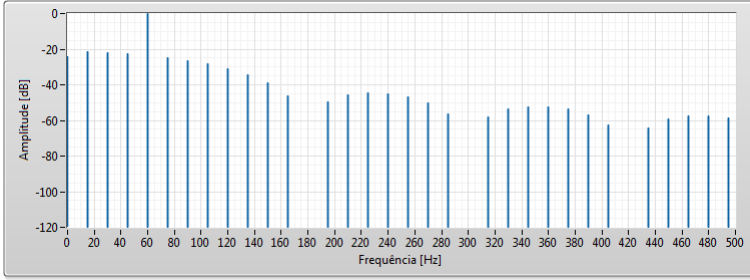


Figura 3.11: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,5B$ .

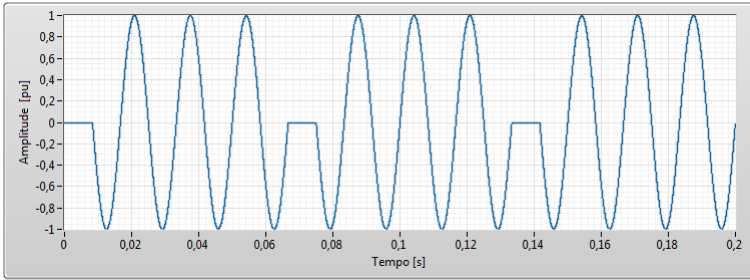


Figura 3.12: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0$ .

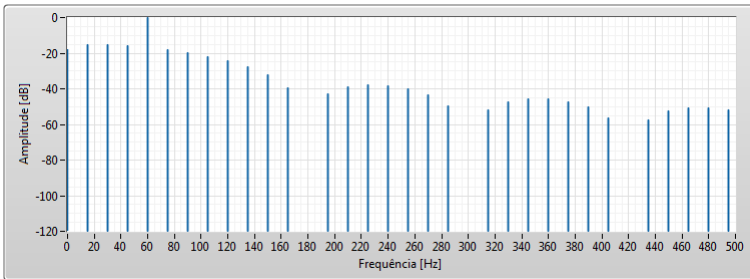


Figura 3.13: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0$ .

A razão pela qual o espectro da Série de Fourier de  $B(t)$  para  $b \neq B$  resulta em valores nulos nas harmônicas ímpares de  $\omega_e$ , é a anulação



dos argumentos do seno e do cosseno da expressão 3.5 que sejam função de  $p$ . Esta condição é satisfeita quando

$$\begin{aligned} \frac{\pi k}{2p} &= (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \forall n \in \mathbb{N} \\ \therefore k &= p(2n + 1) \end{aligned} \quad (3.6)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{\pi k}{p} &= n\pi, \forall n \in \mathbb{N} \\ \therefore k &= np \end{aligned} \quad (3.7)$$

sendo que a Imagem de (3.6)  $\subset$  na Imagem de (3.7). Logo, quando  $k = 1p, 3p, 5p, 7p...$  ambas as funções trigonométricas assumem valor zero. Portanto, este tipo de distorção, na forma de onda aqui considerada, não cria componentes de frequência com valor igual às harmônicas ímpares de  $\omega_e$ .

Este efeito pode ser verificado nos resultados das simulações por Elementos Finitos a serem apresentados na próxima seção, onde se observa que as harmônicas ímpares da fundamental elétrica não alteram seu valor quando se impõe um defeito à máquina. No Apêndice B um teste experimental confirma este comportamento. Cabe salientar que a existência destas componentes harmônicas, tanto na simulação quanto no teste experimental, devem-se às características restritivas de construção destas máquinas elétricas (efeitos de ranhura, distribuição de enrolamentos etc.) como é universalmente conhecido [75].

Um último estudo de caso contempla a adição numérica de ruído branco à forma de onda das séries 3.4 e 3.5, procurando apresentar apenas uma avaliação qualitativa do efeito do ruído no espectro deste sinal, com um valor de assimetria razoável de  $b = 0,9B$ , conforme indicam as figuras 3.14 e 3.15.

Nota-se que, com um nível de ruído de fundo de aproximadamente -80 dB (portanto 10.000 vezes menor que a componente de referência), todas as componentes de frequência cuja amplitude não supera este valor são encobertas. Esta avaliação se mostra interessante pois, nos capítulos 4 e 6 são apresentados resultados de medições experimentais em que comportamento semelhante ocorre. Portanto, para esta metodologia de detecção de faltas é importante projetar um sistema de aquisição com elevadas taxas de rejeição de ruído.

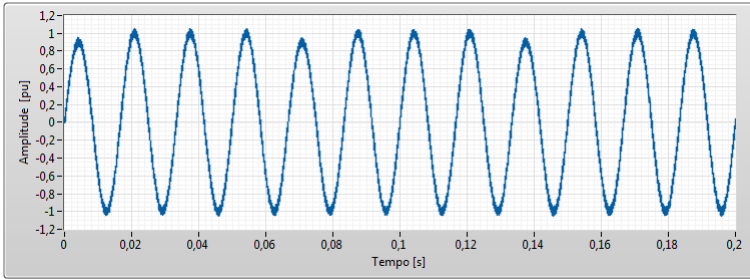


Figura 3.14: Forma de onda de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,9B$ .

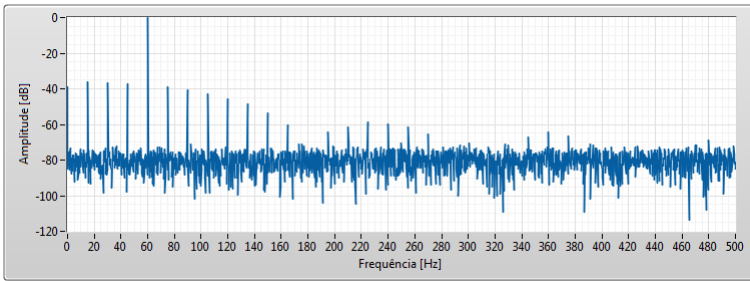


Figura 3.15: Espectro de frequências de  $B(t)$  para o caso com assimetrias,  $B = 1$  pu e  $b = 0,9B$ .

### 3.2 Avaliação do Espectro do Fluxo de Entreferro por Meio de Simulações em Elementos Finitos

Outra maneira de avaliar as distorções produzidas no fluxo de entreferro por uma falta, observado em um ponto estacionário no estator, é por meio de simulações numéricas com softwares de cálculo de campos. Nesta seção, apresentam-se resultados de simulações utilizando o programa EFCAD, do GRUCAD, para um caso em que uma máquina não apresenta qualquer defeito, e outro com um dos polos desalimentado. O modelo em questão é da máquina síncrona de 8 polos utilizada

nos testes experimentais deste trabalho. Nestas simulações, a máquina opera em 50 Hz e a estimação do fluxo é feita por meio de uma bobina-sonda no entreferro, conforme mostra a Figura 3.16. Foram simulados 50 períodos elétricos.

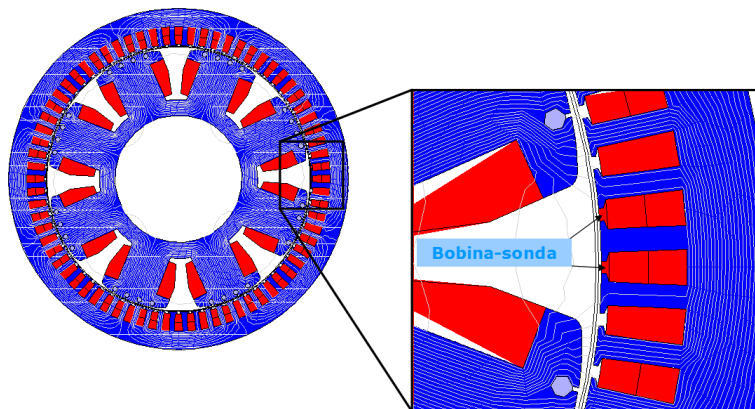


Figura 3.16: Simulação por Elementos Finitos de uma máquina 8 polos sem defeitos. No detalhe vê-se a instalação de uma bobina em um dos dentes da máquina.

Quando a máquina opera sem defeitos, a forma de onda da tensão induzida nos terminais da bobina-sonda é simétrica, como mostra a Figura 3.17.

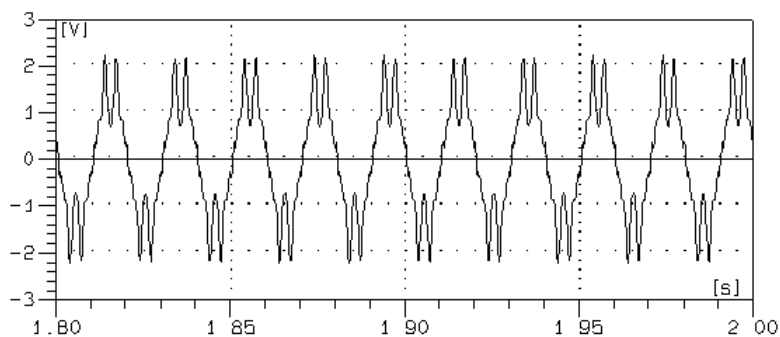


Figura 3.17: Sinal simulado da bobina-sonda para a condição de operação sadia conforme Figura 3.16.

Porém, mesmo sem a imposição de defeitos no modelo, ao se calcular o espectro desta forma de onda podem ser percebidas pequenas componentes de frequência harmônicas da frequência mecânica (12,5 Hz), como apresentado na Figura 3.18. Isto se deve ao fato de que a malha de discretização da simulação não é perfeitamente homogênea, levando então ao surgimento destas componentes.

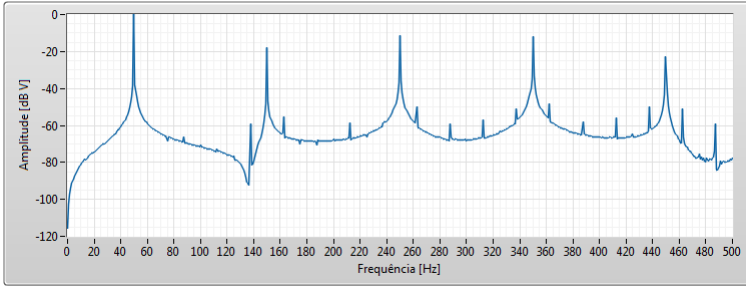


Figura 3.18: Espectro do sinal da Figura 3.17.

Fazendo agora uma simulação com um dos polos desalimentado obtêm-se a sequência de resultados mostrados nas figuras 3.19, 3.20 e 3.21.

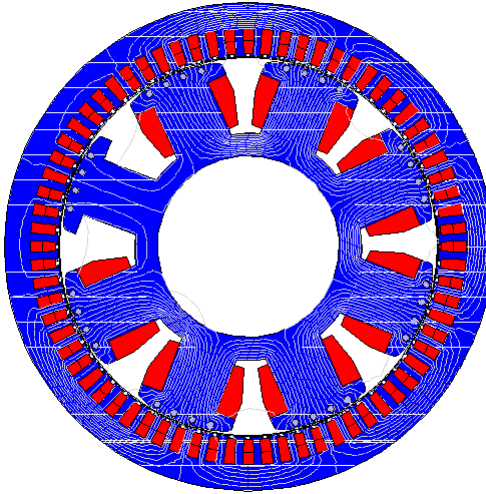


Figura 3.19: Simulação por Elementos Finitos de uma máquina 8 polos com um dos polos desalimentados

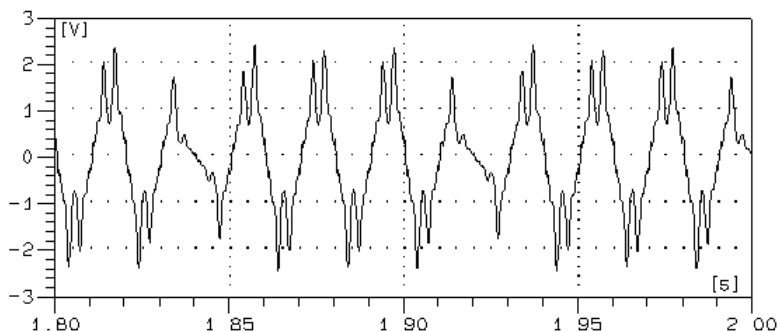


Figura 3.20: Sinal simulado da bobina-sonda para a condição de operação com defeito conforme Figura 3.19.

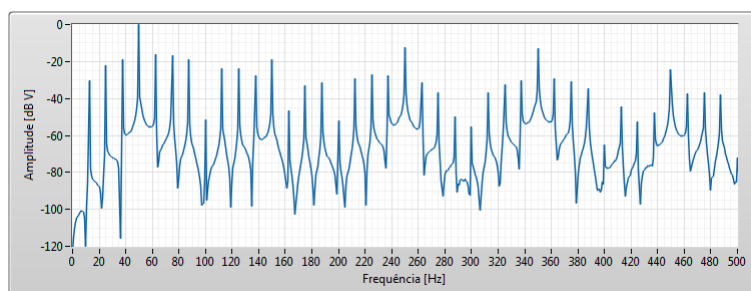


Figura 3.21: Espectro do sinal da Figura 3.20.

Com a imposição do defeito, surgem as componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas previstas, confirmando assim a abordagem realizada no início deste capítulo.

### 3.3 Considerações Finais do Capítulo

O estudo aqui apresentado demonstrou que a utilização da Teoria da Série de Fourier é uma boa alternativa para a representação de variáveis de uma máquina síncrona com assimetrias, pois descreve de forma simples o comportamento do espectro na presença de não idealidades. Os estudos de casos para vários valores de  $b$  também deixam claro que pequenas diferenças na amplitude de um semiciclo produzem espectros com componentes harmônicas da frequência de rotação mecânica da

máquina. Simulações numéricas utilizando Elementos Finitos confirmam este comportamento.

No Capítulo 5 será apresentada a construção de uma máquina síncrona para testes controlados de faltas. Ao utilizar uma bobina no entreferro desta MS, de forma semelhante à simulação numérica apresentada, é possível medir a indução em um de seus dentes e desta forma prover medições que demonstram também experimentalmente este comportamento de pequenas assimetrias entre os períodos elétricos, mesmo para uma máquina sadia. Estes resultados são exibidos no Apêndice B.

## Capítulo 4

# Sistema de Medição de Campos Magnéticos e Testes Iniciais de Detecção de Faltas

O sistema experimental para detecção e avaliação de faltas em máquinas elétricas desenvolvido e utilizado neste trabalho é composto por três elementos principais: o sensor de campo magnético por indução, um sistema de filtragem e amplificação do sinal analógico proveniente do sensor, e o sistema de aquisição e visualização dos dados. Na Figura 4.1 é apresentado um diagrama de blocos que mostra a inter-relação entre os componentes do sistema de medição, sendo cada subsistema descrito ao longo deste capítulo.

### 4.1 Desenvolvimento e Construção do Protótipo de Medição de Campos Magnéticos

No decorrer do desenvolvimento do trabalho, várias versões de protótipos foram construídas. A Figura 4.2 mostra a última delas, montada em uma maleta para fácil transporte e operação em campo.

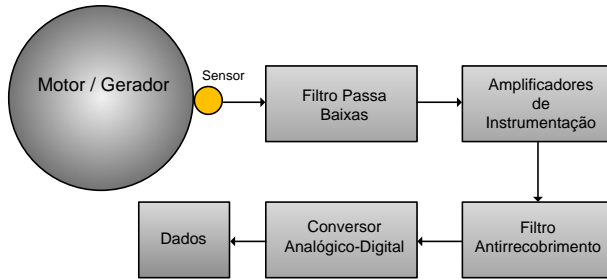


Figura 4.1: Diagrama de blocos do sistema de medição de campo magnético.



Figura 4.2: Foto da última versão de montagem do sistema de medição de campos.

### 4.1.1 Sensores de Campo por Indução

O sensor de campo escolhido para monitorar o campo magnético externo à carcaça do motor é do tipo bobina-sonda com núcleo não ferromagnético. Uma vantagem desse tipo de sensor é que ele pode ser facilmente confeccionado pelo usuário com as dimensões e resposta necessária à aplicação. Ainda assim, quando o campo magnético medido é de pequena amplitude, como é o caso dos campos externos à carcaça de máquinas elétricas, faz-se necessária a utilização de bons sistemas eletrônicos de amplificação e filtragem do sinal, como será apresentado na Seção 4.1.2.

A resposta da bobina-sonda é a forma de onda de tensão  $v(t)$  induzida nos seus terminais pelo campo magnético variável  $H(t)$  que a



sensibiliza. Pela lei de Faraday-Lens [76], tem-se

$$v(t) = -N\mu_0 S \frac{dH}{dt} \quad (4.1)$$

onde  $N$  representa o número de espiras da bobina,  $S$  sua seção transversal (área) e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no ar. A sensibilidade do sensor depende então de sua área e do número de espiras. Este último parâmetro pode ser o maior possível, visando aumentar a sensibilidade da bobina. Quanto à área do sensor, deve-se considerar que, sendo o campo magnético uma grandeza vetorial (Equação 4.2), quanto maior a seção, maior será a contribuição das componentes não perpendiculares à sua janela, dada pelo módulo de  $H(t)$  na Equação 4.3.

$$\vec{H} = H_x \hat{i} + H_y \hat{j} + H_z \hat{k} \quad (4.2)$$

$$H(t) = \sqrt{H_x^2(t) + H_y^2(t) + H_z^2(t)} \quad (4.3)$$

Desta maneira, a resposta do sensor será composta por várias componentes de campo e não apenas pela parcela desejada. Isto implica que, para uma maior resolução espacial, é desejável manter a área do sensor tão pequena quanto possível. Assim, este tipo de sensor magnético pode ser empregado como uma espécie de magnetoscópio com a finalidade de permitir ao técnico obter informações sobre anormalidades em pontos específicos no interior da máquina.

A confecção dos sensores é bastante simples e consiste basicamente no enrolamento do condutor sobre um carretel de material não magnético (que pode ser um cilindro plástico, por exemplo), utilizando-se uma bobinadeira. Neste processo, a acomodação irregular das várias camadas de fio sobre o núcleo (exemplificado na Figura 4.3) altera o valor da área do sensor, que passa a ser considerada resultado do raio médio do enrolamento, como demonstra a Equação 4.4. A Figura 4.3 define as dimensões do carretel utilizado no cálculo da área média  $S_m$  em função do diâmetro externo  $D_e$  e interno  $D_i$ .  $l$  representa a altura do carretel.

$$S_m = \pi \left( \frac{D_e + D_i}{4} \right)^2 \quad (4.4)$$

Um exemplo de sensor confeccionado é apresentado na Figura 4.4

Com esta técnica, fazendo com que os sensores tenham dimensões muito menores que as da máquina elétrica, pode-se assumir que o

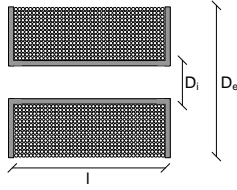


Figura 4.3: Vista em corte de uma bobina-sonda com enrolamento de múltiplas camadas.  $D_e$  é o diâmetro externo do enrolamento, enquanto  $D_i$  o interno.  $l$  representa a altura do carretel.



Figura 4.4: Bobina-sonda construída.

campo medido é uniforme na sua seção, e isto influencia diretamente na avaliação de componentes do campo magnético externo, como foi exposto no Capítulo 2.

### 4.1.2 Condicionamento de Sinais

Mesmo com um elevado número de espiras, o sinal elétrico gerado nos terminais do sensor bobina-sonda é geralmente de baixa amplitude (na ordem de micro a milivolts). Em vários ambientes industriais, a interferência eletromagnética que se soma a este sinal pode ser várias ordens de grandeza superior. Desta forma, é necessário empregar um bom sistema de filtragem e amplificação eletrônica para que a relação sinal/ruído seja adequada à etapa de amostragem digital da informação.

Neste trabalho foram empregados filtros e amplificadores diferenciais como etapas analógicas de processamento do sinal, em uma topolo-

gia desenvolvida em [77]. A Figura 4.5 mostra um diagrama de blocos geral da eletrônica empregada.

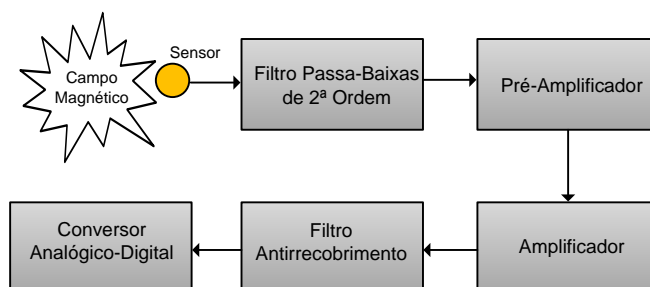


Figura 4.5: Diagrama de blocos do sistema eletrônico de tratamento do sinal.

O filtro passa-baixas é um filtro LC de segunda ordem que utiliza como elemento indutivo o próprio sensor de campo. A rede formada tem atenuação a sinais diferenciais e de modo comum de -40 dB/dec, e sua frequência de corte é selecionada através dos valores das capacitâncias empregadas [77]. A amplificação do sinal é dividida em duas etapas para possibilitar maiores valores de ganho sem distorções.

A última parte do processamento analógico é o filtro antirrecobrimento, utilizado para garantir que nenhuma componente de frequência acima da frequência de amostragem (mínimo de 60 kHz) esteja presente na entrada do conversor analógico-digital.

### 4.1.3 Aquisição de Dados

A aquisição digital dos dados provindos da etapa de processamento analógico do sinal do sensor é feita por placas de amostragem da empresa americana National Instruments, em conjunto com o ambiente de desenvolvimento de Instrumentos Virtuais LabVIEW, do mesmo fabricante. A plataforma integrada hardware-software da National Instruments favorece o processo de programação, tornado-o mais simples e eficiente neste tipo de aplicação. Todos os modelos de placas utilizadas durante esta pesquisa (PCI-6261, USB-6259 e USB-6212) têm resolução de 16 bits e faixa dinâmica de  $\pm 100\text{mV}$  a  $\pm 10\text{V}$ , permitindo uma representação digital dos sinais bastante precisa.

Durante a implementação do software de aquisição e tratamento numérico dos sinais do sensor, foram levados em consideração importantes aspectos para este tipo de digitalização de dados quanto a: **i)** largura de código do amostrador, procurando manter a amplitude do sinal do sensor (após amplificação e filtragem) próxima do limite de entrada estabelecida na placa de aquisição utilizada; **ii)** vazamento espectral, utilizando funções de aquisição que mantenham o número de períodos do sinal fixo ou com o emprego de funções de janelamento; **iii)** atenuação de tensões de *offset*, via funções de software, ainda presentes no sinal após o tratamento analógico, e **iv)** resolução espectral, procurando amostrar uma grande quantidade de pontos.

Estas considerações têm implicações diretas na apresentação dos resultados. Como discutido no Capítulo 2, neste tipo de estudo os resultados são apresentados na forma do espectro de frequências do sinal medido. Portanto, para maior precisão se exige um longo intervalo de tempo de aquisição de amostras, a fim de se obter a melhor resolução espectral possível, a qual é função do número de pontos ou períodos do sinal adquirido. Esta forma de aquisição produz um efeito indesejado na integral numérica do sinal, que se deve a oscilações de baixa frequência próximas ao nível contínuo advindos da instrumentação eletrônica. Como resultado tem-se sinais integrados distorcidos. Assim, a apresentação dos espectros medidos neste trabalho são aqueles do sinal amplificado do sensor (derivada de  $H(t)$  - Equação 4.1), que não passam pelo processo de integração. Esta abordagem não modifica a interpretação dos resultados, uma vez que um processo de integração é uma operação linear, e não modifica portanto o conteúdo espectral do resultado. Neste trabalho, os espectros são apresentados em decibéis de Volts, para permitir uma escala adequada de observações de pequenos sinais. Além disso, quando é necessário adquirir a forma de onda do campo, ou conhecer sua amplitude, utiliza-se o sinal integrado, pois estas operações podem ser realizadas com a aquisição de poucos períodos do sinal.

Finalmente, a Figura 4.6 ilustra a interface de usuário do programa de aquisição e exibição de dados/resultados, enquanto que na Figura 4.7 é apresentado o fluxograma das sequências de operações executadas observando os métodos aqui discutidos.

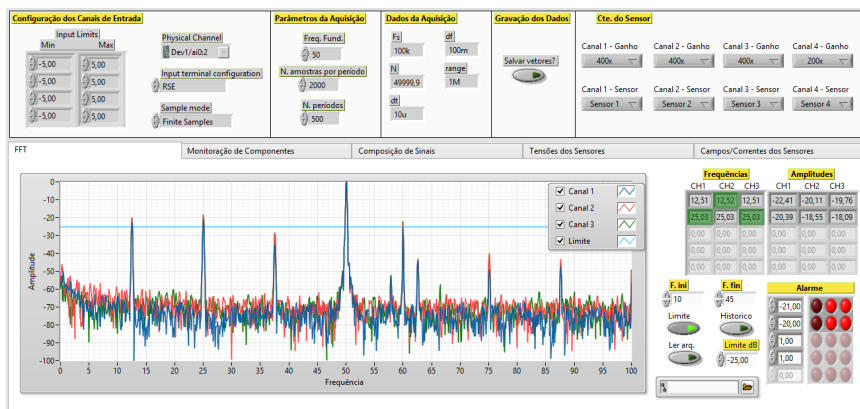


Figura 4.6: Interface de usuário para o programa de aquisição e visualização de dados implementado em LabVIEW.

Nesta interface de usuário, o operador pode monitorar em tempo real a forma de onda e o espectro do campo magnético dos sensores, além de salvar os dados para posterior análise e criação de bancos de dados. Em outro ambiente deste mesmo programa podem ser visualizadas individualmente ou em grupo as amplitudes das componentes de frequência que se deseja monitorar para detectar faltas. Resultados utilizando esta função serão apresentados no Capítulo 6.

O programa também está preparado para operação em campo por meio de uma função de alarme: No Capítulo 6 será mostrado que o estabelecimento de uma falta provoca alterações características na amplitude das componentes de frequência sob análise. Portanto, para cada frequência pode ser estabelecida uma faixa normal de operação. Caso estes valores limites sejam excedidos, o operador é imediatamente informado por qualquer sinal conveniente.

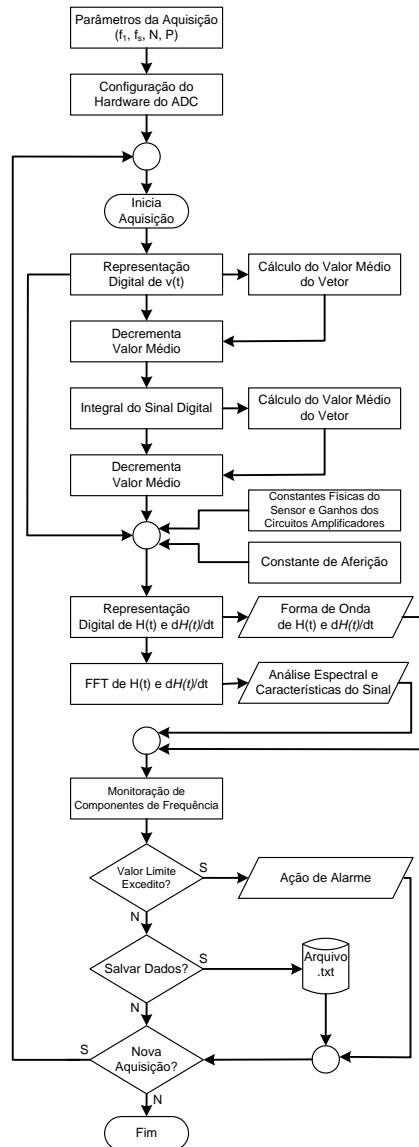


Figura 4.7: Fluxograma para o programa de aquisição e visualização de dados implementado em LabVIEW.

#### 4.1.4 Aferição

Uma Bobina de Helmholtz foi construída para aferir os sensores tipo bobina-sonda. Para garantir um campo homogêneo no seu centro o instrumento foi construído de forma que a distância entre as duas bobinas seja igual ao raio das mesmas [78]. Uma fotografia do aparato é mostrada na Figura 4.8.

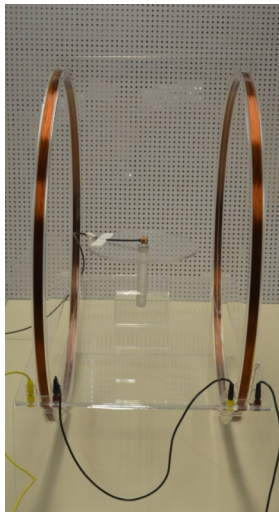


Figura 4.8: Foto da Bobina de Helmholtz para geração de campos magnéticos de referência.

A alimentação da Bobina de Helmholtz foi feita por meio de um amplificador de potência para o sinal de referência fornecido por um gerador de funções Tektronix AFG3102.

Quando respeitada a igualdade entre o raio e a distância entre as bobinas, o valor do campo no centro Bobina de Helmholtz é obtido indiretamente através da Equação (4.5), onde  $N$  representa o número de espiras,  $r$  o raio de cada bobina, e  $i$  a corrente imposta aos enrolamentos [78].

$$H(t) = 0,7155 \frac{Ni(t)}{r} \quad (4.5)$$

A corrente foi mensurada com um multímetro de bancada Agilent 34410a de  $6\frac{1}{2}$  dígitos, sendo esta a medida considerada padrão. Como se pode observar na Figura 4.9, o erro relativo para campos acima de 5

A/m e com frequências superiores a 50 Hz é menor que 1%, enquanto que para frequências tão baixas quanto 5 Hz o erro não ultrapassa os 3%. Em amplitudes abaixo de 5 A/m, especificamente para o valor de 1 A/m (aproximadamente  $1,25 \mu\text{T}$ ), constata-se que o protótipo fornece medidas com erro relativo inferior a 5% para todas as frequências avaliadas. Estes resultados evidenciam que o aparato fornece medidas confiáveis aos estudos realizados neste trabalho. Cabe ressaltar ainda que, em todos os experimentos apresentados nos capítulos 4 e 6, os valores de campo sempre foram maiores do que 1 A/m. Portanto, pode-se admitir que os espectros adquiridos são boas aproximações dos valores reais.

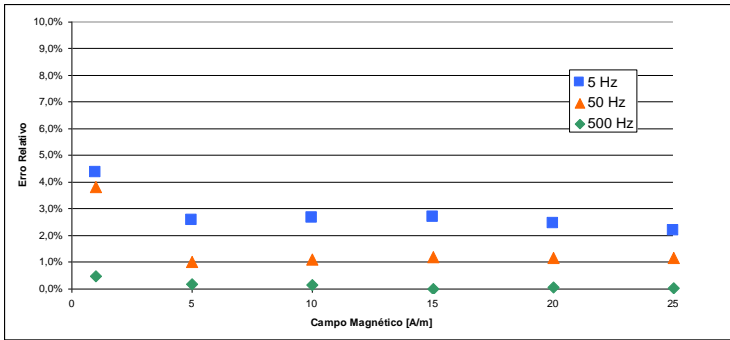


Figura 4.9: Erro relativo do protótipo de medição de campo magnético em relação ao campo da Bobina de Helmholtz.

## 4.2 Testes de Detecção de Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Para testes das primeiras versões da instrumentação e da metodologia desenvolvidas neste trabalho de tese, fez-se uso de máquinas elétricas já disponíveis ao Grupo de Pesquisas, e se deu em dois momentos, para o caso dos motores de indução. O primeiro nas dependências do GRU-CAD, utilizando uma bancada com freio de Foucault e rotores com e sem barras rompidas. O segundo nas instalações da fabricante de motores WEG S.A., com o emprego de uma montagem especial para se avaliar excentricidades. Para cada um dos estudos são apresentados nas seções que seguem os resultados de desempenho do método desenvolvido.



### 4.2.1 Detecção de Barras Rompidas

A avaliação do comprometimento de barras rotóricas somente pode ser feita com o motor sob carga, pois é necessário que haja correntes rotóricas significativas para que as consequências do defeito possam ser observadas. Desta forma, foi empregado para este ensaio um sistema de freio de Foucault, que oferece carga mecânica ao motor, como mostrado na Figura 4.10. Neste ensaio controlado é necessária uma fixação adequada do motor, pois do contrário problemas com vibrações mecânicas adicionais também podem contribuir com perturbações no espectro do sinal. A máquina utilizada é um motor de indução trifásico (MIT), com dados de placa: 380 V, 2,08 A, 60 Hz, 4 polos, rendimento de 70,6%, velocidade nominal de 1730 rpm e potência de 1 cv. Dois rotores foram utilizados no mesmo estator, um deles sem defeitos impostos e outro com três barras rompidas, como mostra a Figura 4.11.

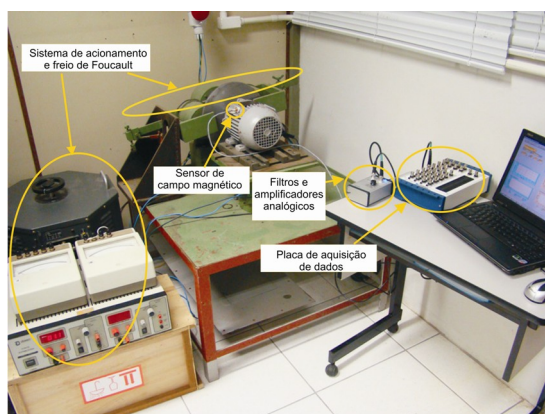


Figura 4.10: Bancada de ensaios utilizada.



Figura 4.11: Rotor com três barras rompidas.

Os resultados obtidos são discutidos nos parágrafos que seguem.

### • Teste com o rotor normal

Com o motor operando com o rotor sadio, foram feitos dois ensaios medindo-se o campo externo. O primeiro com o motor em vazio, (Figura 4.12), e o segundo com o motor em carga nominal (Figura 4.13<sup>2</sup>).

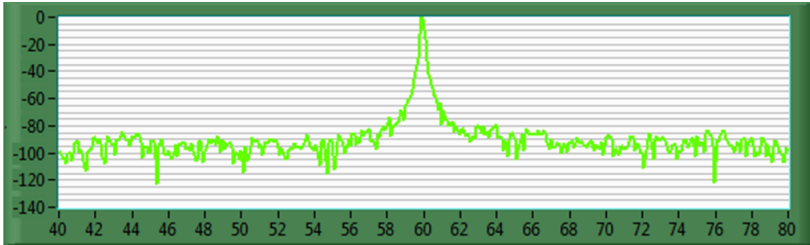


Figura 4.12: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético para o MIT operando com o rotor normal e sem carga.

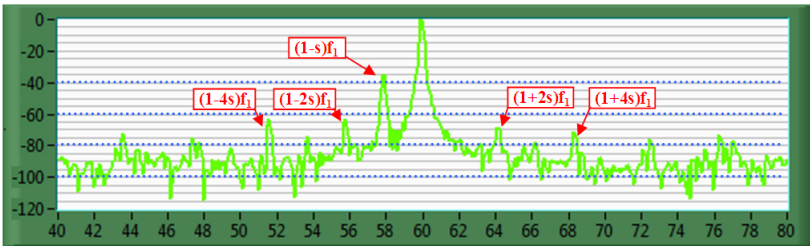


Figura 4.13: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético para o MIT operando com o rotor normal em carga nominal.

Analisando os espectros nestas duas figuras, pode-se notar que para a máquina sem carga não há nenhuma outra componente de frequência além daquela da alimentação. Para o caso sob carga, algumas das frequências previstas pela Equação 2.1 aparecem. É importante perceber que estas componentes, embora com baixas amplitudes, estão

<sup>2</sup>Nestas figuras, obtidas com uma versão preliminar do software de aquisição, a Abcissa recebe a grandeza Frequência em [Hz], enquanto a Ordenada representa a amplitude das componentes do espectro relativas à fundamental em [dBV]. O mesmo se aplica aos demais espectros ao longo deste capítulo.

presentes mesmo para o rotor sem defeitos. As imperfeições de construção da máquina, o sistema de imposição de carga e a fixação do motor são aspectos de desbalanceamentos mecânicos do experimento que certamente contribuem para o surgimento das mesmas - comportamento este semelhante àquele encontrado por Brito [51] com um medidor comercial. É também visível na Figura 4.13 uma componente de frequência  $f_1(1 - s)$  que se deve à frequência de rotação do rotor. O valor do escorregamento obtido por um tacômetro óptico ( $s=3,5\%$ ), é também confirmado pela componente de frequência  $sf_1$  visível na Figura 4.14, conforme discussão apresentada na Seção 2.2.

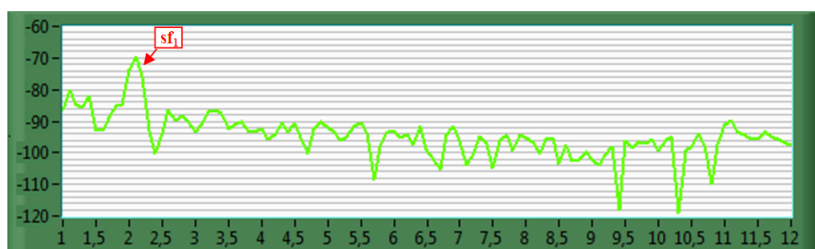


Figura 4.14: Seção inicial do espectro do sinal do sensor de campo magnético para o MIT operando com o rotor normal em carga nominal.

### • Teste com o rotor com três barras danificadas

Embora seja possível demonstrar os efeitos da falta por barras rompidas para outros valores de carga, neste texto são apresentados apenas aqueles relativos à carga nominal do motor, pois as manifestações da falta são ligeiramente mais evidentes e simplificam a exposição deste estudo. Na Figura 4.15 apresenta-se o espectro da tensão induzida no sensor de campo para o motor operando em vazio, e como esperado, não se detecta nenhuma componente lateral à fundamental.

Quando a carga é imposta os efeitos da falta claramente se manifestam, como pode ser observado na Figura 4.16. Uma série de frequências dadas pela Equação 2.1 são visíveis na seção do espectro apresentada (para  $k=1, 2$  e  $3$ ). As amplitudes de todas estas componentes são também significativamente maiores quando comparadas ao caso da Figura 4.13, mostrando que o defeito é detectado de maneira inequívoca.

O escorregamento para este caso foi de  $4,13\%$  e pode também ser visualizado através da componente  $sf_1$  na Figura 4.17.

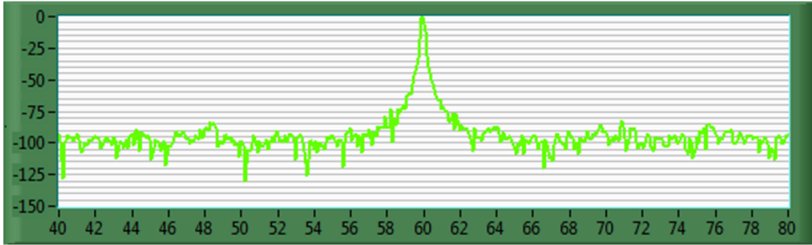


Figura 4.15: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético, para o MIT operando com o rotor defeituoso e sem carga.

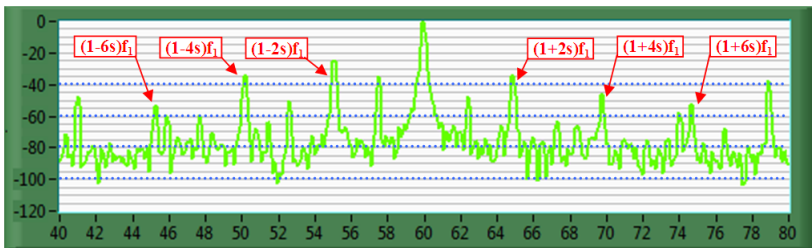


Figura 4.16: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético, para o MIT operando com o rotor defeituoso em carga nominal.

## 4.2.2 Detecção de Excentricidades

Quanto ao estudo de detecção de excentricidade pelo campo magnético externo, foi utilizado um motor protótipo desenvolvido pelo fabricante de motores WEG durante o doutoramento de S. L. Nau [52]. O motor, mostrado na Figura 4.18, é trifásico, com as seguintes características construtivas: 1 cv, 8 polos, 380 V, 60 Hz, tendo 36 ranhuras no estator, 44 ranhuras no rotor e 1,0 mm de entreferro. Uma montagem especial permite impor o grau de excentricidade radial desejado. Neste estudo foi considerada apenas a excentricidade estática e o sensor de campo magnético foi fixado sobre o núcleo do estator de forma a medir o fluxo radial externo do motor.

O efeito da falta sobre o campo magnético externo foi avaliado também por uma simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando os dados disponíveis do motor e o software de simulação de campos EFCAD. Nesta simulação, o motor é alimentado em tensão e é empregada a técnica da Banda de Movimento para se considerar o deslocamento excêntrico do entreferro [79]. Assume-se também funcio-

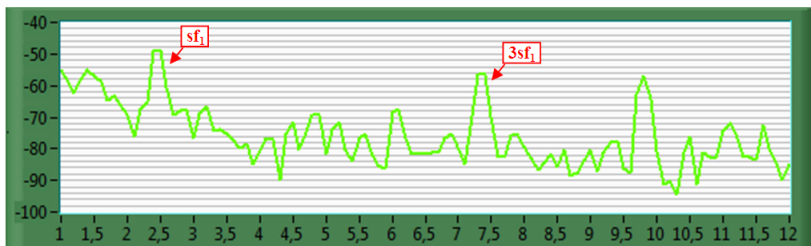


Figura 4.17: Seção inicial do espectro do sinal do sensor de campo magnético, para o MIT operando com o rotor defeituoso em carga nominal.

namento em regime e sem carga. Na Figura 4.19 é mostrada a posição onde a indução magnética é calculada na parte externa da máquina, e uma área destacada no entreferro indica uma outra região de avaliação na parte interna do motor.

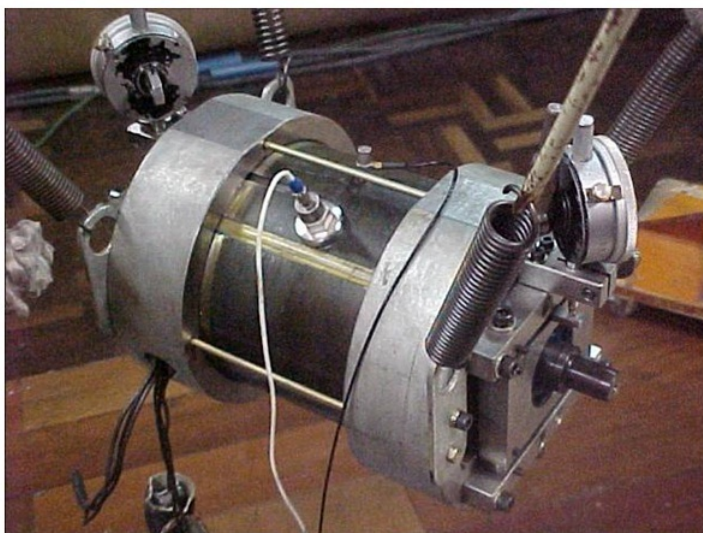


Figura 4.18: Motor protótipo para controle de excentricidade.

Para melhor visualização, a região destacada na Figura 4.19 é ampliada para demonstrar o posicionamento do sensor no entreferro, como mostra a Figura 4.20.

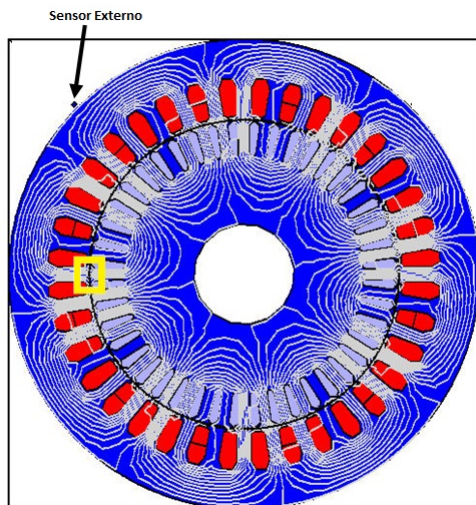


Figura 4.19: Carta de campos e locais de avaliação da indução magnética no modelo numérico do motor.

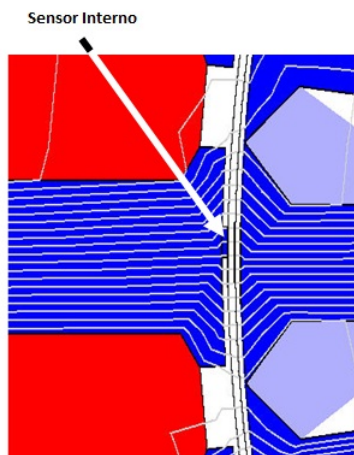


Figura 4.20: Região de avaliação da indução magnética no entreferro.

Os resultados das simulações foram obtidos para um deslocamento de 0,3 mm no entreferro para o lado oposto ao ponto onde a indução é avaliada na Figura 4.19, fazendo com que a distância entre rotor e

estator seja maior nesta área. A avaliação dos resultados é feita de modo comparativo entre os espectros das induções para os casos com e sem excentricidade, como mostram as figuras 4.21 e 4.22, respectivamente.

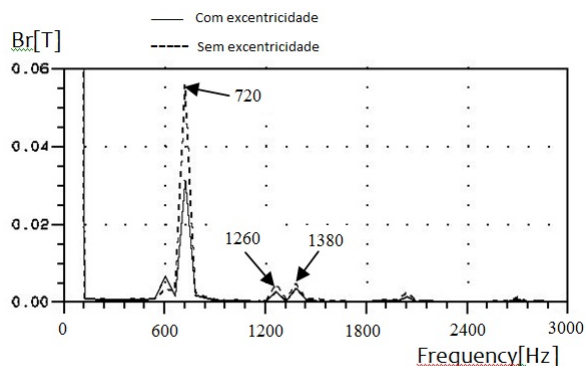


Figura 4.21: Espectro simulado da indução na região de entreferro do motor.

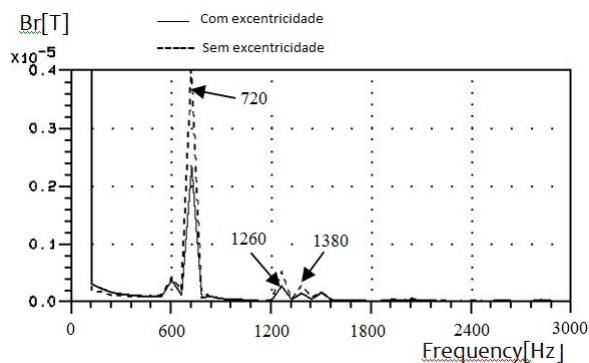


Figura 4.22: Espectro simulado da indução na região externa do motor.

Por meio dos resultados destas simulações é possível notar que, primeiramente, tanto o fluxo interno quanto externo ao motor contém essencialmente o mesmo conteúdo espectral. Além disso, há um decréscimo de amplitude significativo na componente de frequência de 720 Hz do caso sem excentricidade comparado ao com excentricidade.

É possível observar que as demais componentes também sofrem diminuição em amplitude, embora menos significativamente.

O resultado experimental de medição do campo externo ao motor é apresentado na Figura 4.23, que mostra a decomposição espectral da tensão induzida na bobina sensora.

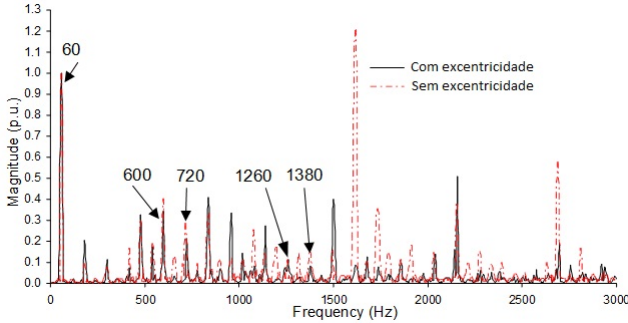


Figura 4.23: Espectro da tensão induzida no sensor, para o experimento com e sem excentricidade.

Da mesma forma que para as simulações numéricas, experimentalmente as componentes de 600, 720, 1260 e 1380 Hz estão presentes, as quais são previstas pela Equação 2.2 para excentricidade estática. O seu comportamento para os casos com e sem defeito verifica-se o mesmo, com uma diminuição de amplitudes com a adição da falta. No entanto, neste resultado experimental observa-se também algumas outras componentes de frequência que não foram obtidas via simulação ou previstas pela relação 2.2 (principalmente para frequências acima de 1500 Hz), e que têm mudanças significativas de amplitude entre os casos. Isso demonstra que as alterações provocadas no fluxo medido não são completamente contempladas pelos modelos analíticos e numéricos aqui apresentados.

### 4.3 Testes de Detecção de Falhas em Geradores Síncronos

Uma primeira avaliação do método desenvolvido para a medição do campo magnético externo de máquinas síncronas (MSs) foi realizada em duas séries de experimentos. A primeira delas em um laboratório de ensino, procurando avaliar a condição de operação de máquinas



didáticas. A segunda foi feita em um gerador síncrono hidráulico de grande porte.

### 4.3.1 Estudos em Máquina Síncrona Didática

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade e a viabilidade do sistema de medição para detecção de faltas em máquinas síncronas, uma primeira bateria de ensaios foi realizada no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC. Apesar de não ser possível impor a esta máquina faltas controladas, sabia-se que a mesma estava operando precariamente dados os excessivos ruídos sonoros e vibrações, porém sem se conhecer os seus defeitos. A bancada é composta por um motor de corrente contínua trabalhando como máquina motriz, e por uma MS de 4 polos, 230 V, 5 A, 50/60 Hz.

Na presente seção, apresentam-se os resultados obtidos com medições do campo externo da MS operando como gerador, conforme mostra a montagem da Figura 4.24.

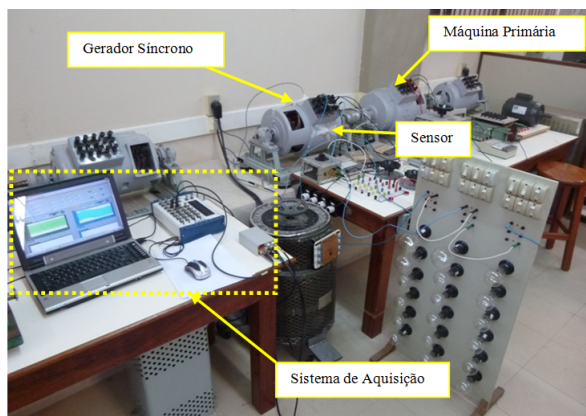


Figura 4.24: Bancada de testes com máquina síncrona operando como gerador.

Inicialmente, sem energizar as máquinas sob estudo, fez-se uma medição do campo magnético local a fim de se avaliar as componentes de ruído presentes no ambiente. A Figura 4.25 mostra o espectro da tensão induzida no sensor para este caso. Nota-se a presença de uma componente de campo magnético na frequência de 60 Hz e de algumas de suas harmônicas pares e ímpares, que se devem principalmente ao

sistema de iluminação do laboratório e ao sistema de alimentação da bancada.

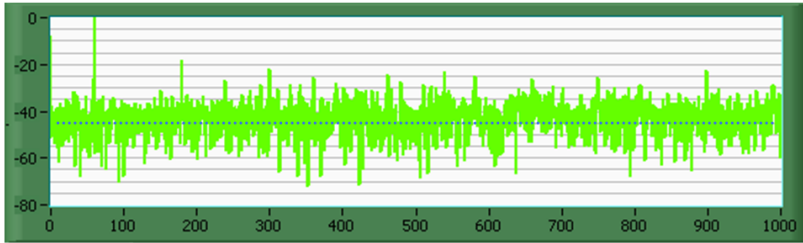


Figura 4.25: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético para análise do ruído de fundo do ambiente.

Com o gerador em operação, porém sem carga aplicada, a medição do campo magnético externo forneceu o espectro observado na Figura 4.26, onde foi possível observar as componentes de frequência sub-harmônicas e inter-harmônicas previstas pela Equação 2.3. Nesta figura assinalam-se as primeiras ordens ímpares das componentes, para  $k=1, 3, 5$  e  $7$ ).

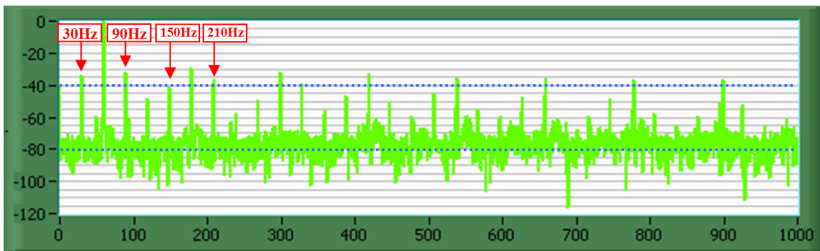


Figura 4.26: Espectro relativo do sinal do sensor de campo magnético para uma excitação para tensão terminal de 100 V.

Com os resultados positivos de detecção de componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas nos ensaios de laboratório, foram feitos testes em campo a fim de se verificar seu funcionamento em ambientes industriais, como será tratado nos parágrafos a seguir.

### 4.3.2 Estudos em Gerador Hidroelétrico

Para averiguar a aplicabilidade em campo do sistema em uma de suas primeiras versões, medições foram realizadas em um hidrogerador, den-

tro e fora do seu compartimento de isolamento a gás. A Figura 4.27 mostra a instalação do sistema de medição dentro do compartimento, com sensores redundantes de campo posicionados em uma chapa que protege mecanicamente o estator. Os dados da máquina são: 290 MW, 56 polos e 60 Hz.

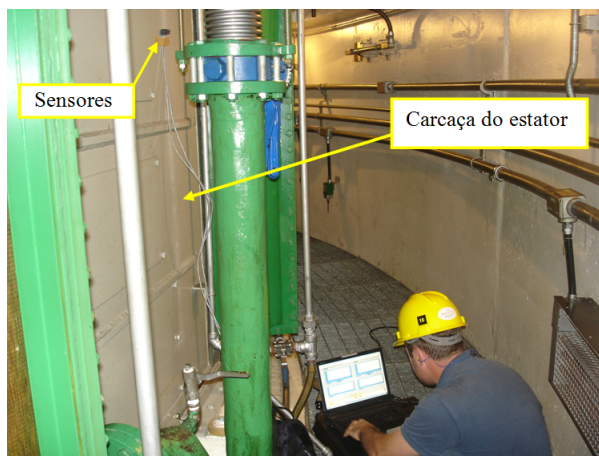


Figura 4.27: Instalação do sistema de medição dentro do compartimento do gerador A.

- **Medição do campo interno ao compartimento do gerador A**

A Figura 4.28 apresenta o espectro do sinal do sensor na instalação mostrada na Figura 4.27, em que são notáveis as componentes harmônicas da fundamental elétrica em 180 Hz, 300 Hz, 360 Hz, 420 Hz, 540 Hz, 660 Hz, 780 Hz e 900 Hz.

Ao se observar o espectro anterior até o limite de 100 Hz (Figura 4.29), percebe-se a existência das componentes de frequência sub-harmônicas e inter-harmônicas. Por exemplo usando a Equação 2.3, para  $k=1$  tem-se  $f_d=2,1$  Hz e para  $k=5$   $f_d=10,7$  Hz. As mesmas frequências podem ser obtidas ao se considerar a velocidade mecânica e o número de polos desta máquina, ou seja, tomando a frequência mecânica como fundamental de 2,1 Hz.

Este último resultado mostra que há uma vasta gama de informações que podem ser utilizadas para a detecção de faltas incipientes para este tipo de máquina síncrona, embora só se possa atribuir determinadas

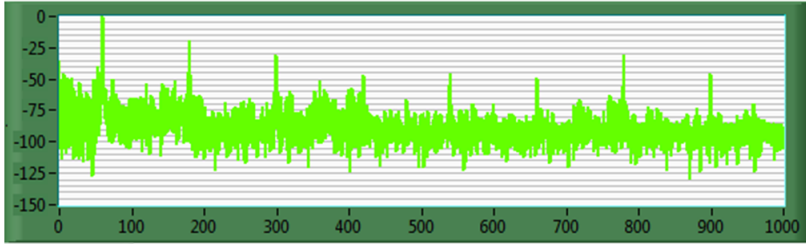


Figura 4.28: Espectro relativo da tensão induzida no sensor instalado na carcaça interna do gerador 'A'.

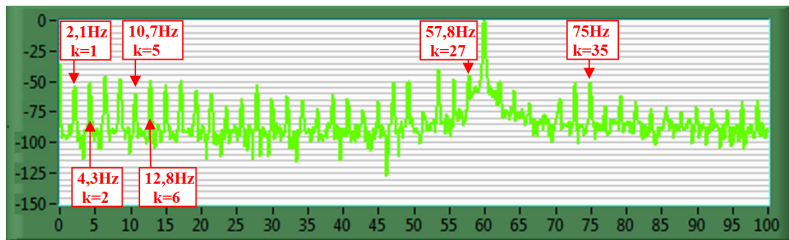


Figura 4.29: Seção inicial do espectro da tensão induzida no sensor instalado na carcaça interna do gerador 'A'.

componentes a faltas específicas após a reunião de uma ampla coleção de dados históricos ou testes controlados, dada a complexidade deste tipo de instalação. Sendo esta uma máquina com manutenção preventiva executada periodicamente, acredita-se que dificilmente existiriam, no momento da medição, curto-circuitos ou outros defeitos incipientes. No entanto, baixos níveis de vibração existem naturalmente nestas instalações, além das assimetrias construtivas, o que causa a existência das componentes encontradas.

- **Medição do campo externo ao compartimento do gerador A**

Na intenção de investigar se o nível de amplitude do campo magnético disperso do gerador permitiria medições também na parte externa do seu compartimento de isolamento a gás, aquisições do campo foram realizadas com os sensores posicionados em contato com a face externa da parede da estrutura, cujo lado interno está visível na Figura 4.27. O resultado da medição é apresentado na Figura 4.30, onde é possível perceber que apesar de haver a atenuação das amplitudes relativas de

algumas das frequências, as mesmas são ainda mensuráveis. De maneira semelhante ao espectro apresentado na Figura 4.28, as principais componentes são 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz, 360 Hz, 420 Hz, 540 Hz, 660 Hz, e 780 Hz.

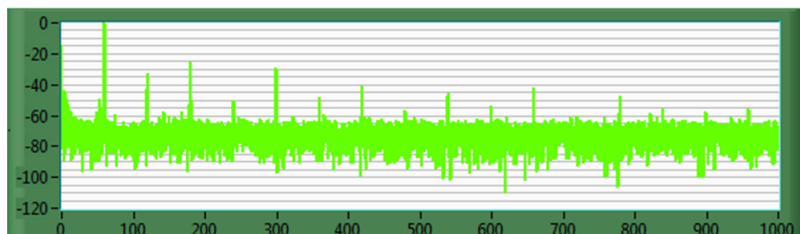


Figura 4.30: Espectro relativo da tensão induzida no sensor instalado na parede externa do compartimento do gerador 'A'.

Mesmo possuindo grande atenuação para esta instalação, a parte inicial do espectro neste ponto de medição permite também a observação de várias componentes, como mostra a Figura 4.31.

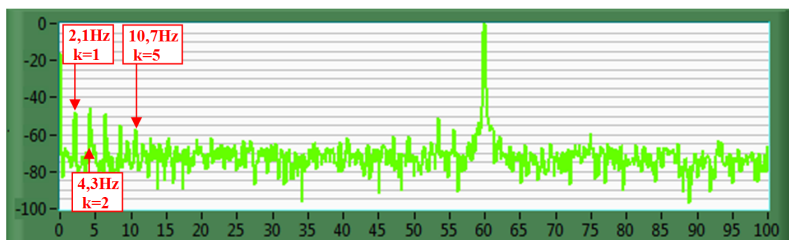


Figura 4.31: Seção inicial do espectro da tensão induzida no sensor instalado na parede externa do compartimento do gerador 'A'.

## 4.4 Considerações Finais do Capítulo

Desde o início desta pesquisa teve-se a preocupação em se desenvolver toda a metodologia de testes já voltada à utilização de campo. Embora poucas modificações tenham sido feitas nos sensores e na topologia dos circuitos de tratamento eletrônico dos sinais, a montagem física e a interface de usuário foram gradativamente alteradas conforme surgiram as necessidades de visualização e análise de dados.

Por meio dos testes de medição e análise do fluxo externo em motores de indução e geradores síncronos, constatou-se que todas as mon-

tagens tiveram respostas adequadas às aplicações. Em especial, com a última delas conseguiu-se um erro de aferição bastante razoável, em se considerando as tecnologias disponíveis.

Os resultados apresentados nas seções 4.2 e 4.3 demonstram que o protótipo construído e a metodologia de detecção de faltas por um único sensor de campo magnético externo obtém êxito em diversas situações. Esta confiabilidade no método permitiu o prosseguimento da pesquisa com a construção de uma bancada dedicada para imposição de faltas, como será tratado no Capítulo 5.

## Capítulo 5

# Bancada de Simulação de Defeitos em Geradores Síncronos

Considerando satisfatórios os resultados obtidos nos estudos preliminares apresentados no Capítulo 4 deste trabalho, decidiu-se pelo projeto e construção de uma bancada dedicada que permitisse a imposição controlada de faltas diversas em uma máquina síncrona. Desta maneira seria possível avaliar de forma criteriosa o método experimental de detecção de faltas por meio do campo magnético externo em máquinas desta natureza.

Utilizando fomento do programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da Agência Nacional de Energia Elétrica (P&D ANEEL - processo PD-0403-0033-2012), em parceria com a empresa Tractebel Energia S.A. que possui em seu parque gerador tanto hidrogeradores quanto turbogeradores, encomendou-se à empresa Equacional, de São Paulo, a construção de uma bancada com duas máquinas síncronas – uma com oito polos salientes e outra com dois polos lisos. As especificações técnicas do equipamento são detalhadas a seguir.

### 5.1 Especificações da Bancada

O grupo gerador foi concebido de tal forma que o acionamento mecânico é realizado por apenas um motor de corrente contínua (CC) posicio-

nado entre as duas máquinas síncronas, conforme ilustra a Figura 5.1, na qual também é mostrada a montagem geral do equipamento e painel de acionamento. Este motor CC foi projetado com duas formas de excitação de modo a atender aos requisitos de velocidades das máquinas síncronas de oito e dois polos. Em virtude da maior velocidade de operação da máquina de dois polos, foi utilizada uma embreagem magnética para desacoplar o acionamento mecânico do gerador de menor velocidade ao se acionar a máquina de dois polos (observar item 5 da Figura 5.1). Na Tabela 5.1 são apresentados os principais parâmetros nominais das máquinas elétricas que compõem a bancada de simulação de faltas.

Tabela 5.1: Parâmetros nominais da bancada de simulação de faltas em máquinas síncronas.

Descrição	Motor CC	MS 2 Polos	MS 8 Polos
Potência	10 kW (5+5)	10 kVA	10 kVA
Rotação	700 a 4000 rpm	3000 a 3600 rpm	750 a 900 rpm
Corrente de Armadura	56 A	15,2 A	15,2
Tensão de Armadura	220V (série/paralelo)	380 V (Y+N)	380 V (Y+N)
Frequência	CC	50/60 Hz	50/60 Hz
Tensão de Campo	220 V	220 V	220 V
Corrente de Campo	5,5/1,6 A	2,1 A	3,5 A
Fator de Potência	-	0,8 indutivo	0,8 indutivo
Ventilação	Forçada	Autoventilado	Autoventilado

## 5.2 Detalhes Construtivos para Imposição Controlada de Defeitos

Por meio de pesquisas bibliográficas e em conversas com engenheiros da área, foi possível elencar os principais e mais comuns defeitos em máquinas síncronas. Posteriormente, a empresa fabricante de máquinas elétricas Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. foi consultada para se verificar a viabilidade técnica de construção dos detalhes necessários à



simulação das faltas elétricas e mecânicas. Desta forma definiu-se pela implementação dos seguintes defeitos nas máquinas síncronas:

**Curto-circuito no enrolamento de campo:** Esta falta é simulada por meio de taps que diminuem o número de espiras de um dos polos das máquinas síncronas, conforme esquemas apresentados nas figuras 5.2 e 5.3 para as máquinas de dois e oito polos, respectivamente;

**Curto-circuito no enrolamento de armadura:** O curto-circuito em enrolamento de armadura pode também ser simulado por meio de taps que diminuem o número de espiras de um grupo, em cada uma das três fases, conforme esquemas apresentados nas figuras 5.4 e 5.5 para as máquinas de dois e oito polos, respectivamente;

**Circuito aberto da gaiola de amortecimento:** As barras do enrolamento amortecedor podem ser facilmente interrompidas por meio da retirada dos conectores entre os anéis de curto superior e inferior, como mostra a Figura 5.6;

**Curto-circuito entre lâminas do núcleo:** Um maneira encontrada para simular um curto-circuito entre lâminas do núcleo estatórico foi através de inserção de uma espira curto-circuitada que enlaça uma seção do pacote até o primeiro duto de ventilação, conforme diagrama da Figura 5.7;

**Excentricidade estática:** A simulação de rotor com excentricidade estática é feita com a utilização de mancais que podem deslocar independentemente cada uma das pontas de eixo na direção vertical, proporcionando um deslocamento de até 50% do valor nominal de entreferro de 2 mm. A fotografia da Figura 5.8 mostra o sistema de deslocamento de eixo por meio de manoplas e também o transdutor de ferro móvel que proporciona a medição da excentricidade;

**Desbalanceamento mecânico:** Na Figura 5.8 também é possível notar a flange montada em cada uma das extremidades das máquinas síncronas para fixação de massas com o objetivo de provocar desbalanceamentos mecânicos.

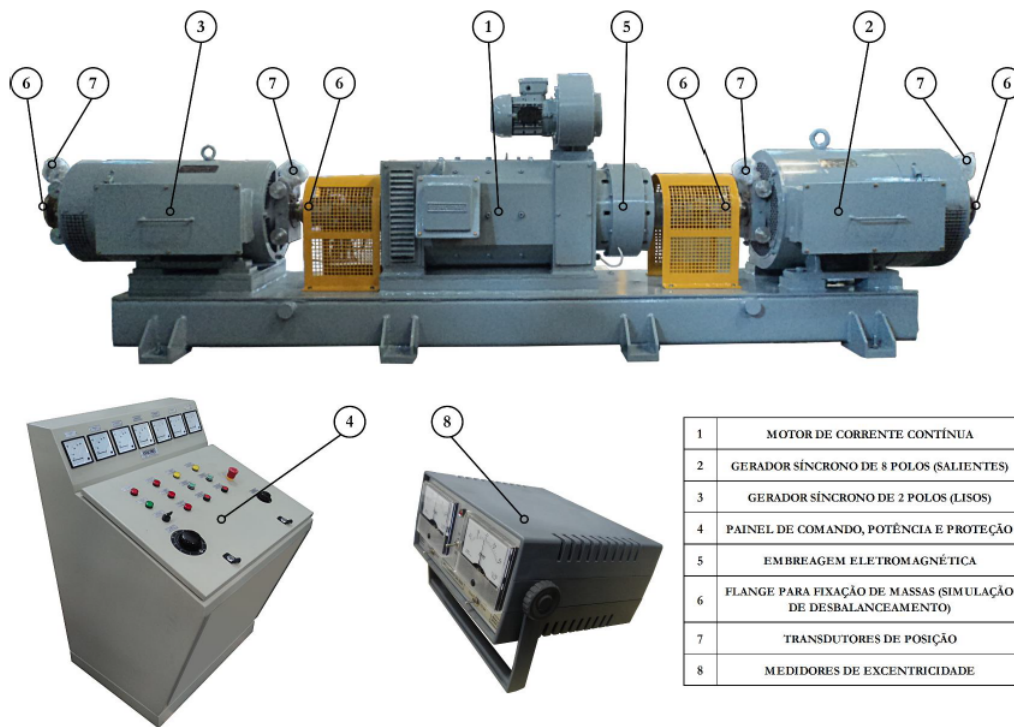


Figura 5.1: Bancada de simulação de defeitos em máquinas síncronas.

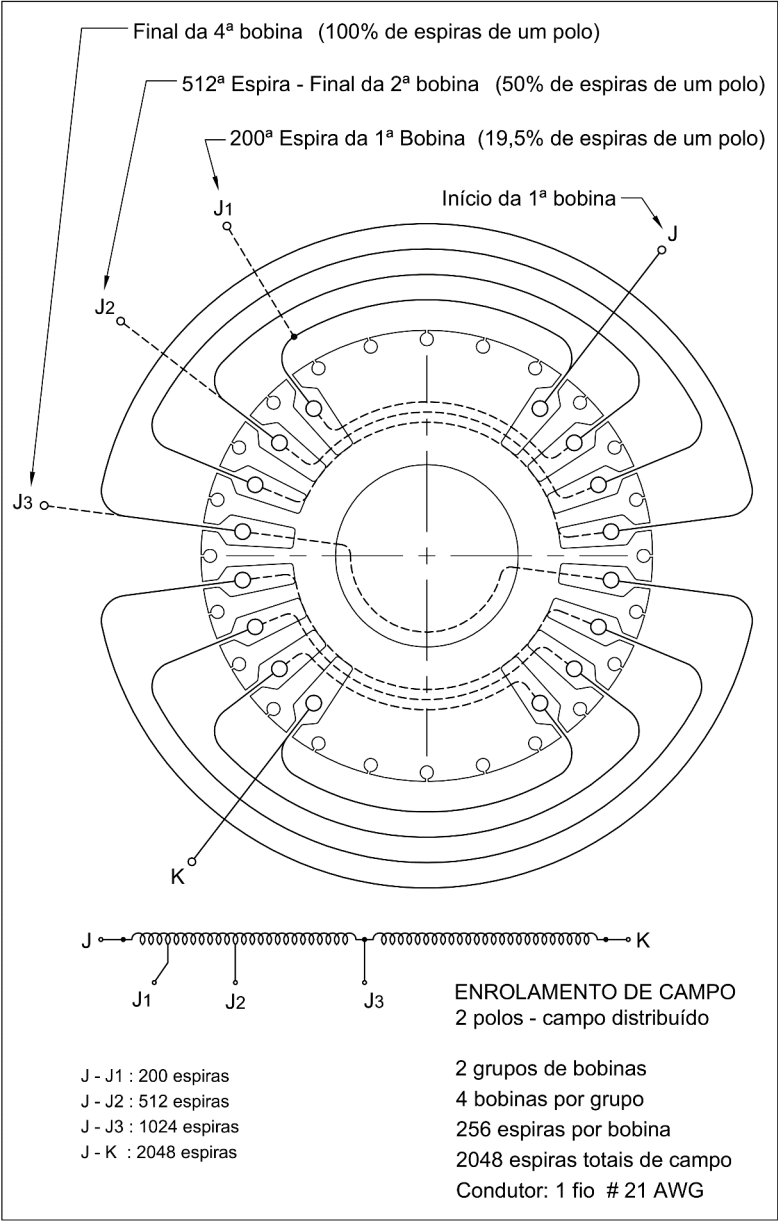


Figura 5.2: Bobinagem de campo do gerador síncrono de 2 polos.

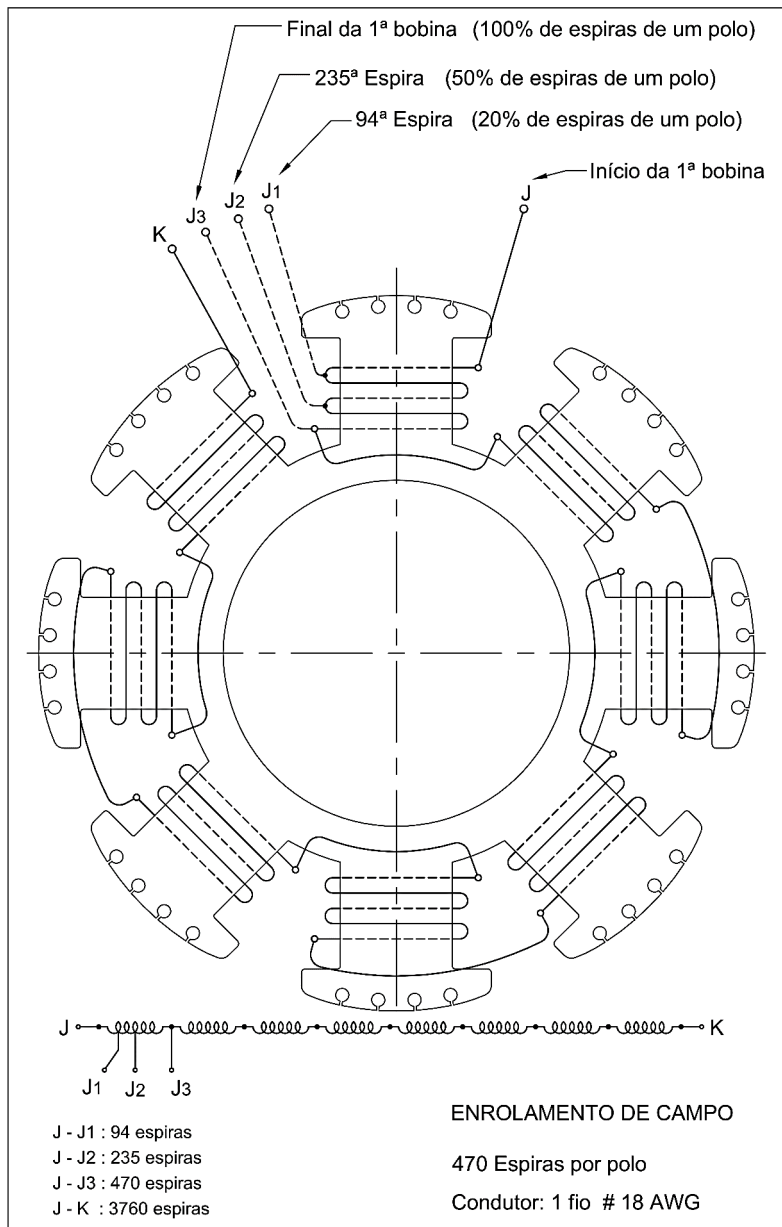


Figura 5.3: Bobinagem de campo do gerador síncrono de 8 polos.

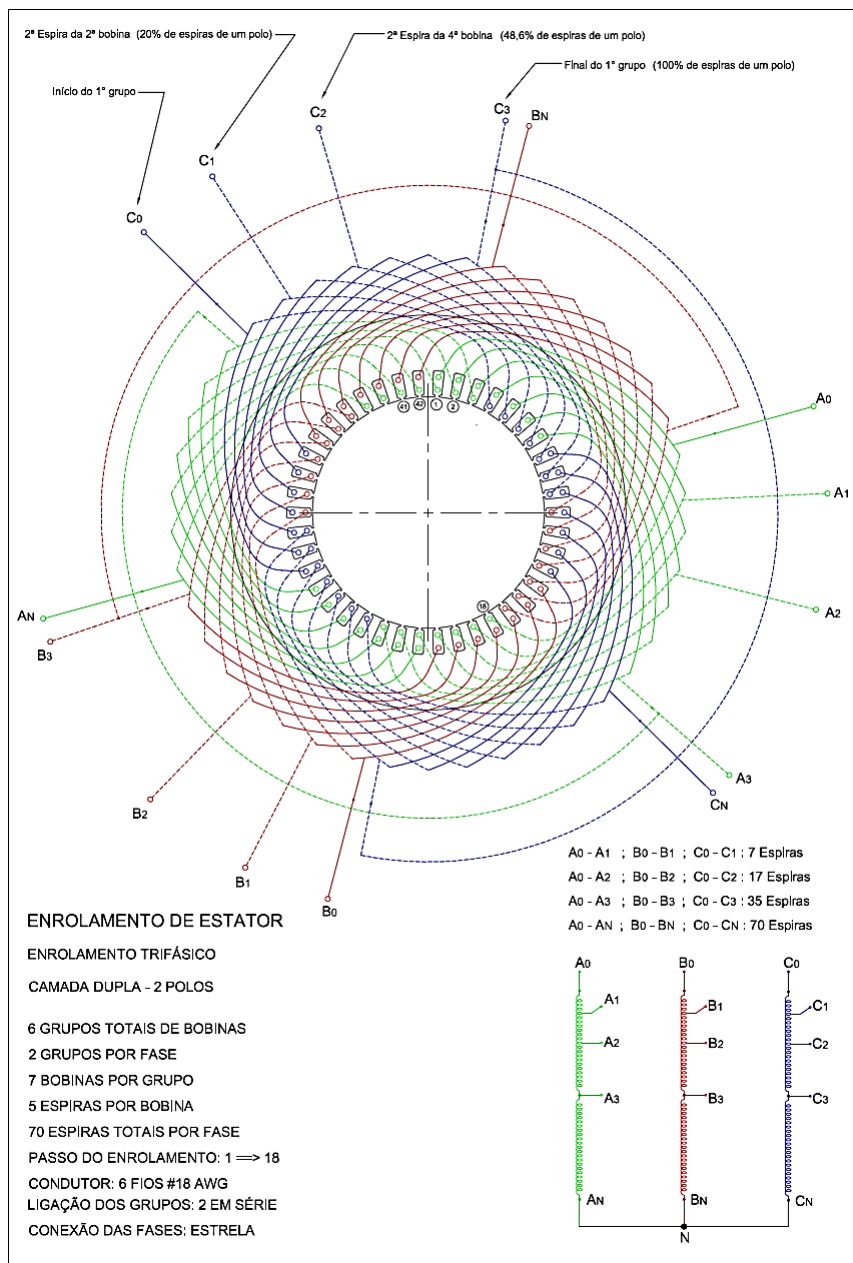


Figura 5.4: Bobinagem de armadura do gerador síncrono de 2 polos.

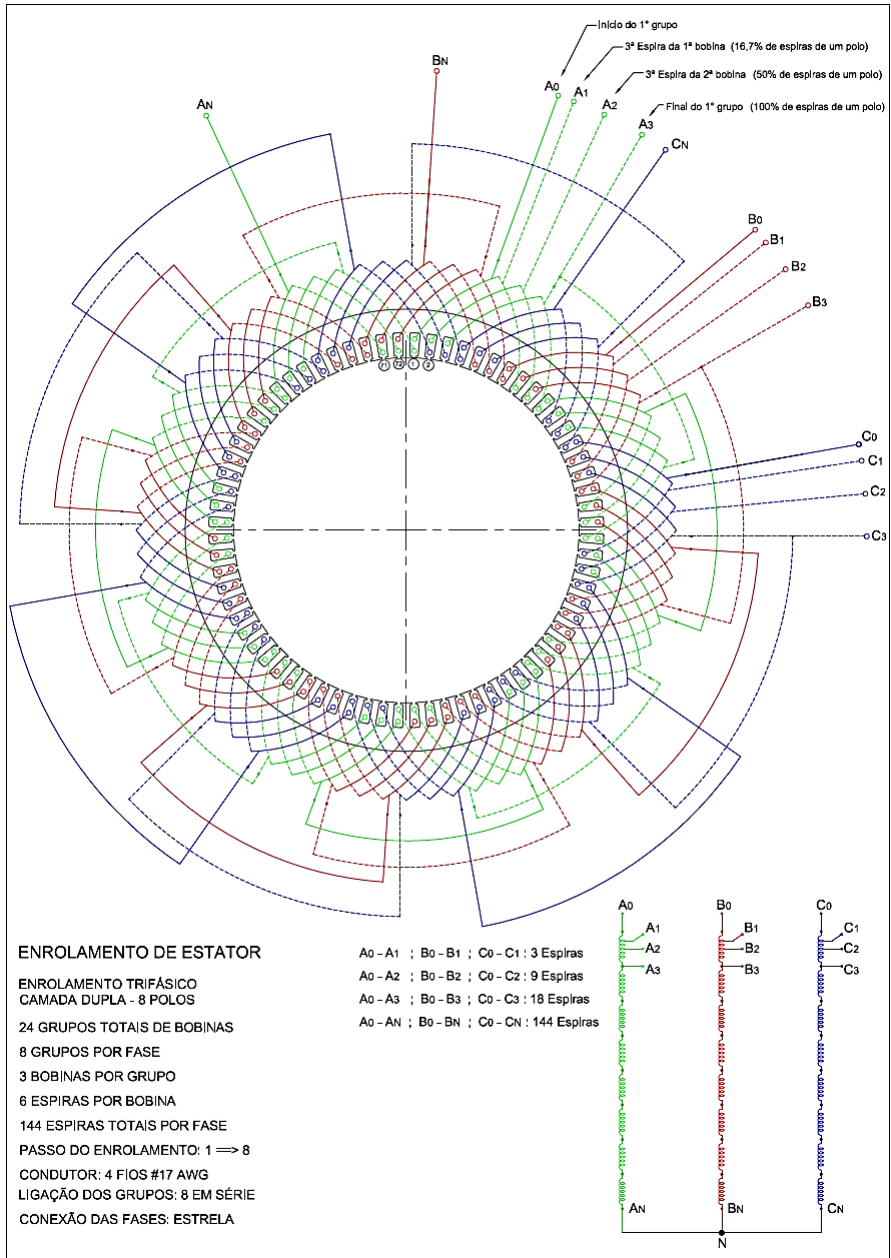


Figura 5.5: Bobinagem de armadura do gerador síncrono de 8 polos.

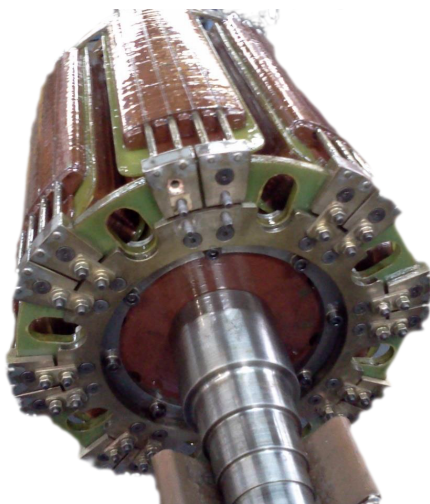


Figura 5.6: Detalhe do sistema de abertura da gaiola amortecedora no rotor de 8 polos.

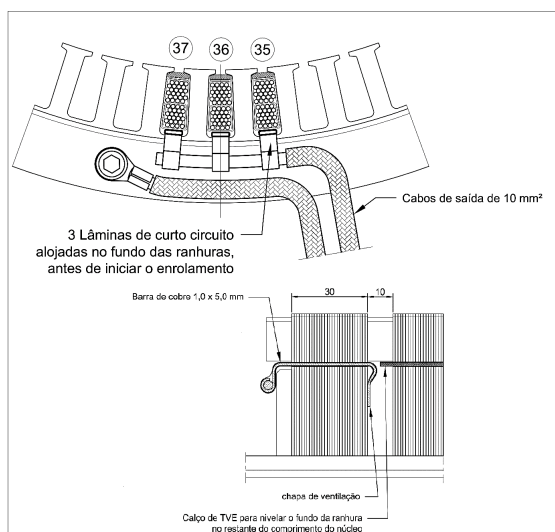


Figura 5.7: Esquema do sistema de simulação de curto-circuito entre lâminas em trecho parcial do núcleo.

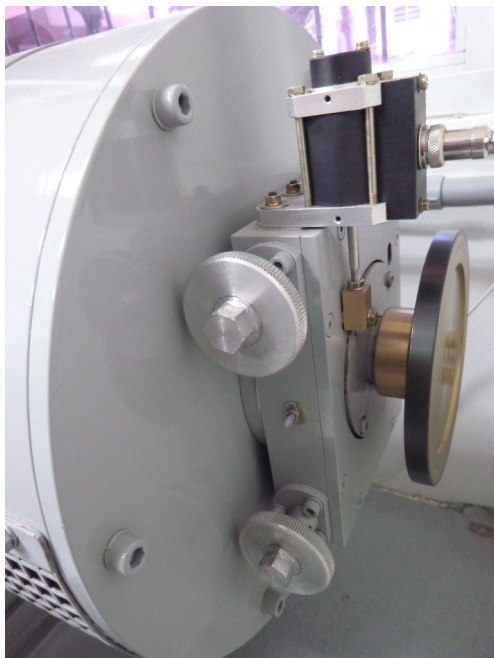


Figura 5.8: Flange para fixação de massas e mancal para variação de entreferro.

Solicitou-se ao fabricante que incluísse no entreferro dos geradores várias bobinas sondas. Desta forma seria possível avaliar a correspondência entre os fluxos internos e os campos captados externamente - que invariavelmente estão somados a ruídos. Na figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os esquemáticos com o posicionamento das bobinas exploratrizes.





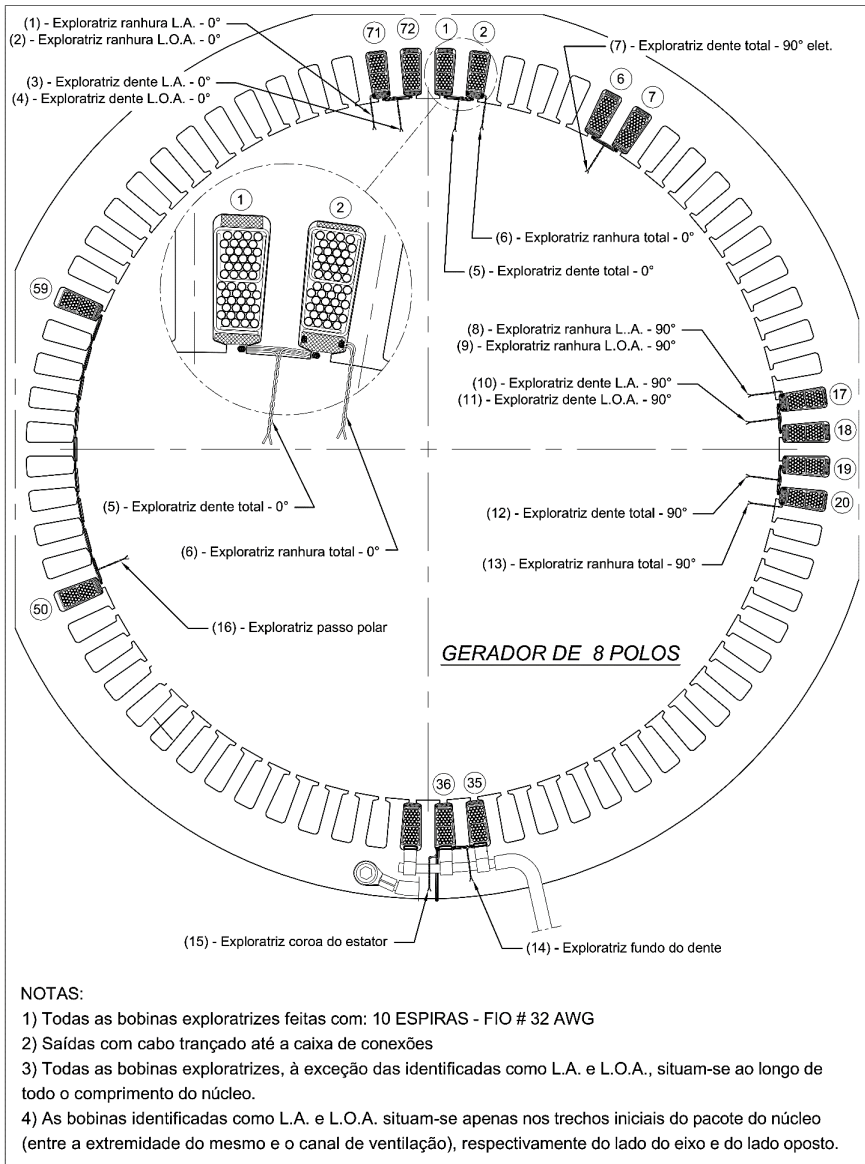


Figura 5.10: Instalação das bobinas exploratrizes no entreferro do gerador síncrono de 8 polos.

## Capítulo 6

# Resultados Experimentais para Análise de Desempenho do Método de Detecção de Falhas

Com a bancada de testes apresentada no Capítulo 5 em funcionamento, foram realizados diversos ensaios a fim de avaliar a eficácia do método de detecção de falhas com apenas um sensor externo. Os resultados são apresentados ao longo deste capítulo, em que as amplitudes das componentes de frequência sub-harmônicas são monitoradas em função da intensidade de cada falta separadamente, ilustrando assim a sua sensibilidade para cada um dos estudos.

Por questões relacionadas ao cronograma do trabalho de tese, optou-se por trabalhar apenas com a máquina síncrona de oito polos. Além disso, três restrições técnicas limitaram o escopo dos testes na bancada projetada. A primeira foi a capacidade de imposição de carga à máquina síncrona operando como gerador, em virtude da capacidade de corrente do conversor estático disponível no laboratório para alimentação do motor de corrente contínua. Assim, pôde-se aplicar ao conjunto uma carga resistiva de 1.500 W por fase, ou 56,25% da carga nominal. A segunda restrição diz respeito ao teste de falta por desbalanceamento mecânico, a qual necessita fixação de massas na flange visível na Figura 5.8. Por motivo de segurança, na eventualidade de uma destas massas se soltar, esta operação só deve ser realizada com a utilização

de um anteparo adequado, não disponível durante a período de testes para este trabalho. A terceira restrição está relacionada ao teste de desconexão das barras da gaiola de amortecimento, o qual necessita a criação de um transitório para que haja correntes induzidas nas barras da gaiola e consequente criação de fluxo por este circuito. Um procedimento para implementar de maneira controlada este transitório não pode ser efetivado neste trabalho.

Como o principal objetivo do trabalho foi o de buscar detectar falhas com a utilização de um único sensor externo, todas as medições de campos com o sensor desenvolvido foram realizadas posicionando-o sobre o centro da máquina elétrica na direção do campo tangencial, em conformidade com a discussão apresentada na Seção 2.1.

## 6.1 Ruído Magnético Ambiente

Inicialmente, com os equipamentos desligados na sala de testes onde a bancada está instalada, foram realizadas algumas aquisições para avaliar o conteúdo espectral do ruído magnético no ambiente. As figuras 6.1 e 6.2 apresentam o espectro de uma medição do campo magnético pelo sensor posicionado sobre a carcaça da máquina síncrona de oito polos. Nota-se que na faixa de frequências de até 1k Hz estão presentes todas as componentes harmônicas da frequência comercial de 60 Hz. Este panorama magnético é comum em instalações comerciais e industriais, dada a quantidade de equipamentos (máquinas elétricas, conversores estáticos etc), além de cabos de alimentação para correntes alternadas ou retificadas, utilizados na maioria das atividades produtivas.

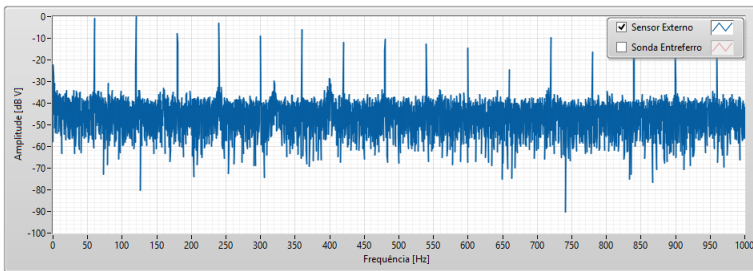


Figura 6.1: Espectro do ruído de fundo no ambiente de estudo, medido pelo sensor externo à carcaça da máquina.

A Figura 6.2 mostra a porção inicial do espectro do ruído ambi-

ente, onde é possível observar que não existem componentes abaixo da frequência comercial de 60 Hz. Como será discutido adiante, além do comportamento sob defeitos das máquinas síncronas avaliadas ser mais evidente nesta seção do espectro, também nela não se encontram amplitudes significativas para os ruídos ditos convencionais. Portanto, considera-se que esta região menos ruidosa pode fornecer medidas mais confiáveis.

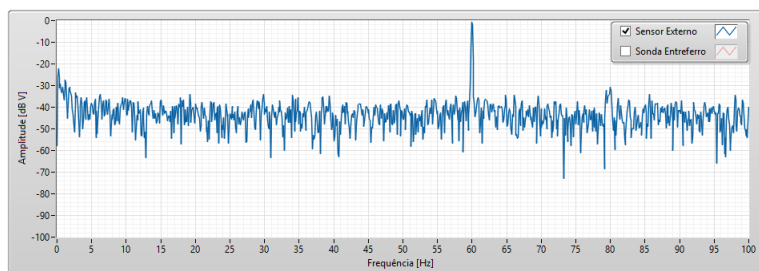


Figura 6.2: Espectro do ruído de fundo no ambiente de estudo, medido pelo sensor externo, evidenciando a parte inicial do espectro.

A mesma avaliação do nível de ruídos foi realizada para a sonda de entreferro utilizada (sonda exploratriz de dente número 4 - Figura 5.5), conforme se apresenta nas figuras 6.3 e 6.4. Neste caso nota-se que, por estar o sensor no interior da massa ferrosa da máquina, os níveis dos ruídos observados anteriormente na medição externa são agora fortemente atenuados. Porém, ainda assim são evidentes as componentes de 60, 120 e 240 Hz, que também encontram acoplamento no cabeamento entre os sensores e o sistema de tratamento de sinais.

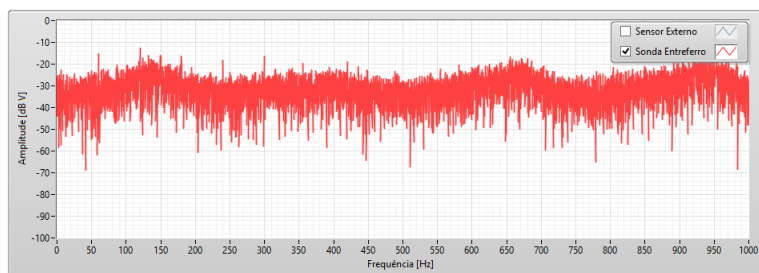


Figura 6.3: Espectro do ruído de fundo no ambiente de estudo, medido pela sonda no entreferro da máquina (sonda exploratriz de dente número 4 - Figura 5.5).

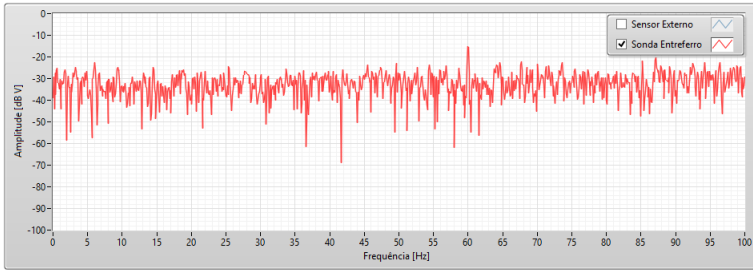


Figura 6.4: Espectro do ruído de fundo no ambiente de estudo medido pela sonda no entreferro (sonda exploratriz de dente número 4 - Figura 5.5), evidenciando a parte inicial do espectro.

## 6.2 Avaliação de Sub-Harmônicas

Esta seção procura consolidar experimentalmente os conceitos apresentados nos capítulos 2 e 3, além de possibilitar uma primeira apresentação do funcionamento do método de medição, sua sensibilidade e possíveis interferências antes da apresentação de detecções de faltas propriamente ditas.

Como já citado, todas as medições externas foram feitas com a bobina medindo a componente  $\mathbf{b}_{TAN}$  (vide Figura 2.5, e as internas com a sonda exploratriz número 4, conforme Figura 5.5). A avaliação das componentes sub-harmônicas como variáveis de observação das faltas é feita por meio do histórico de suas amplitudes.

Nos capítulos 2 e 3 também foi discutido que uma máquina real, por possuir pequenas assimetrias, contará com a presença de sub-harmônicas e inter-harmônicas no seu espectro. Assim, também na máquina de oito polos avaliada nesse estudo são encontradas estas componentes de frequência, mesmo no seu estado considerado sadio.

### 6.2.1 Influência do ruído na região espectral das sub-harmônicas

Dando continuidade ao estudo de ruídos nas medições em laboratório, realizaram-se agora medidas com a bancada acionada e operando à velocidade de 750 rpm (50 Hz), procurando assim evidenciar as diferentes componentes produzidas pela operação do gerador e aquelas provenientes do ruído ambiente, conforme se pode observar na Figura 6.5. Novamente, de acordo com a discussão apresentada nos capítulos

2 e 3, os desbalanceamentos inerentes da máquina provocam o surgimento das componentes sub-harmônicas em 12,5, 25 e 37,5 Hz além das inter-harmônicas em 62,5, 75 Hz etc. Contudo nota-se a permanência do ruído de 60 Hz e o aparecimento de uma componente de frequência em 58 Hz. Esta última componente se deve à frequência mecânica do campo girante do motor de indução para ventilação da máquina motriz da bancada (ver seções 2.2 e 4.2).

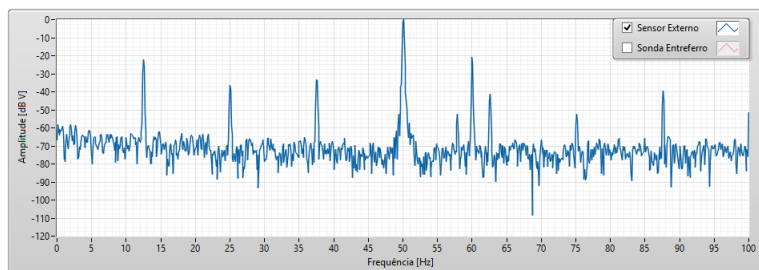


Figura 6.5: Espectro do campo externo à máquina síncrona acionada à velocidade de 750 rpm.

Resulta portanto evidente que em determinadas situações componentes de frequência geradas por equipamentos próximos podem ser somadas no espectro medido. Mesmo conhecendo esta banda do espectro como menos susceptível a ruídos comuns, este resultado chama a atenção para que cuidados sejam tomados, principalmente para testes em campo.

### 6.2.2 Comparação entre os espectros internos e externos na região das sub-harmônicas

Para avaliar a correspondência entre o espectro do campo magnético interno e externo do gerador síncrono, uma medição simultânea pelos dois sensores foi realizada. O experimento foi conduzido na velocidade de 900 rpm (60 Hz) uma vez que se conhece o comportamento do ruído ambiente na faixa de observação. As componentes sub-harmônicas devem ser, dada esta  $\omega_m$  e segundo a Equação 2.3: 15, 30 e 45 Hz. Os espectros magnéticos medidos são apresentados na Figura 6.6. Nota-se que as medições pela sonda no entreferro e pelo sensor externo são bastante semelhantes, diferindo apenas, como esperado, pela relação sinal ruído de cada medição. Embora Zidat et al. [45] não tenham abordado a questão sob a avaliação de componentes sub-harmônicas (ou

componentes múltiplas da frequência mecânica) a utilização do sensor posicionado para medir a componente  $b_{TAN}$  reflete o conteúdo do entreferro (vide Seção 2.1).

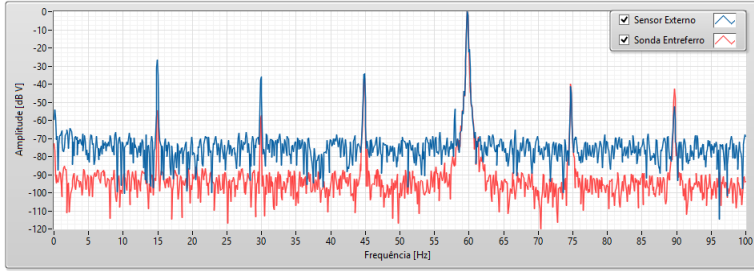


Figura 6.6: Espectro do campo externo e interno à máquina síncrona acionada à velocidade de 900 rpm.

### 6.2.3 Influência do posicionamento dos sensores de campo magnético externo

O posicionamento dos sensores de campo magnético sobre a carcaça na máquina sob estudo foi considerado em duas situações. A primeira delas dispondo três sensores tecnicamente idênticos (com parâmetros praticamente iguais) no centro do gerador em avaliação, mas separados de aproximadamente 120 graus no seu entorno. E a segunda abordagem distribuindo os mesmos três sensores em linha reta, com um deles no centro da máquina e outros dois em cada uma das extremidades. Uma sequência de monitoração das amplitudes da componente sub-harmônica de 15 Hz, para cada um dos casos, é apresentada nas figuras 6.7 e 6.8.

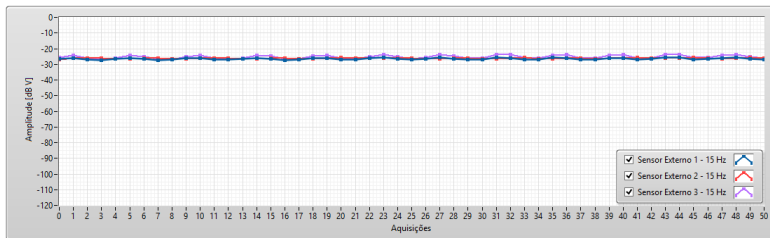


Figura 6.7: Histórico da componente sub-harmônica de 15 Hz do campo externo para diferentes posições radiais do gerador síncrono.



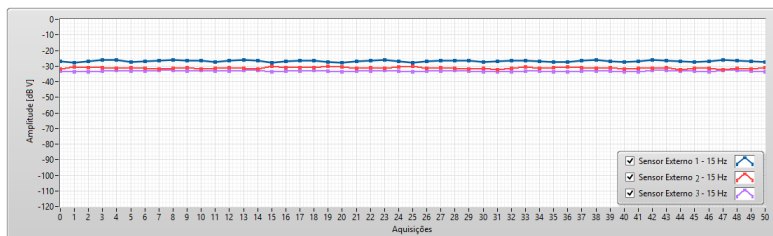


Figura 6.8: Histórico da componente sub-harmônica de 15 Hz do campo externo para diferentes posições axiais gerador síncrono.

Destes ensaios, pode-se considerar que as amplitudes medidas da sub-harmônica monitorada não variam com a distribuição dos sensores em diferentes raios da máquina. No entanto, sua distribuição axial modifica sensivelmente a amplitude da componente. Ainda que este estudo de posicionamento do sensor externo tenha viés qualitativo, indica que, mais uma vez, a abordagem descrita por Zidat et al. em [45] sobre o monitoramento da componente  $\mathbf{b}_{TAN}$ , tangencial à superfície da carcaça, seja a mais indicada para se obter uma aproximação do fluxo de entreferro.

A oscilação observada nas figuras 6.7 e 6.8 se deve à vibração mecânica da bancada. Resultados adicionais sobre este comportamento são apresentados no Apêndice C.

## 6.2.4 Influência da carga na região espectral das sub-harmônicas

Com o gerador operando sem a imposição de defeitos e à 900 rpm (60 Hz) foi realizada uma avaliação da influência da carga na amplitude das sub-harmônicas. Lembrando-se que, como citado no início deste capítulo, por restrições da instalação foi empregada 56,25% da carga nominal. A Figura 6.9 mostra uma sequência de aquisições dos valores de amplitudes das sub-harmônicas medidas pela sonda interna e pelo sensor externo. Com exceção da componente de 30 Hz, as sub-harmônicas de 15 e 45 Hz do fluxo no entreferro tiveram um ligeira alteração em sua amplitude na mudança de operação em vazio para sob carga. O sensor posicionado no entreferro também mede o fluxo de reação de armadura.

As amplitudes das componentes monitoradas externamente à máquina tiveram também um pequeno incremento médio de aproximadamente 2 dBV. Embora estas variações tornem-se visíveis por ocorrerem

no degrau de alteração de carga, o valor permanece dentro da flutuação observada em função da vibração mecânica do conjunto.

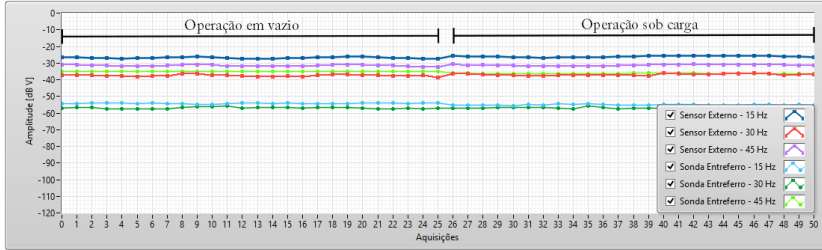


Figura 6.9: Avaliação da influência da carga nas componentes sub-harmônicas.

Como consequência, embora pouco significativa, esta mudança na amplitude das variáveis monitoradas deve ser considerada ao se compor o histórico de assinatura magnética da avaliação de faltas. Portanto todos os ensaios apresentados nas seções seguintes foram realizados com a carga disponível imposta ao gerador.

## 6.3 Detecção de Curto-Circuitos no Enrolamento de Campo

A avaliação de curto-circuito no enrolamento de campo foi o primeiro tipo de falta avaliada com o sistema da bancada de ensaios, e foi também o que demonstrou, entre todos os estudos, a maior alteração na amplitude das componentes sub-harmônicas do gerador. Como pode ser observado na Figura 6.10, conforme o agravamento da falta, a amplitude das variáveis monitoradas aumentam. Na mudança do estado sadio para a retirada de 20% das espiras de um polo, todas as três componentes observadas aumentam em amplitude, em proporções ligeiramente diferentes, porém em aproximadamente 12 dBV.

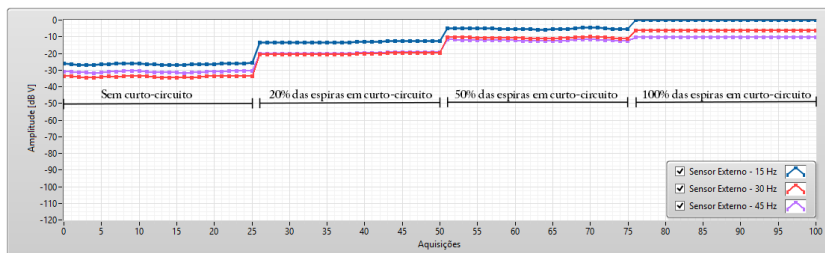


Figura 6.10: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta de curto-circuito no enrolamento de campo.

Com a simulação de agravamento da falta, ao se retirarem ainda mais espiras as amplitudes das sub-harmônicas continuam a crescer, novamente em proporções distintas, mas de maneira constante. Para um curto-circuito simulado em 50% das espiras houve um aumento médio de 7,5 dBV em relação ao estado anterior, ou 19,5 dB em relação ao estado considerado sadio.

Retirando todas as espiras de um polo as amplitudes tiveram incremento ainda maior, de aproximadamente 5 dBV para as componentes em 15 e 30 Hz, e 2,5 dBV para a componente de 45 Hz. É interessante notar na Figura 6.10 que a amplitude da componente de 15 Hz atingiu o mesmo valor da componente elétrica fundamental de 60 Hz.

Os resultados deste estudo mostram que para este tipo de falta o método apresenta grande sensibilidade, permitindo detectá-la facilmente.

## 6.4 Detecção de Excentricidade Estática

Para o estudo do efeito da excentricidade no campo magnético externo, o eixo do gerador de oito polos foi deslocado em seus dois mancais de três maneiras: movendo apenas uma das extremidades, ou as duas na mesma direção e em direções opostas, como indicado na Figura 6.11. As alterações no entreferro foram feitas em passos de 0,25 mm, desde a condição saudável (eixo alinhado, com calibração de fábrica) até o valor de 0,50 mm, e então dobrando este último para o máximo desalinhamento possível de 1,0 mm (metade do entreferro nominal da máquina). Assim, foram impostas condições de 12,5%, 25% e 50% de excentricidade.

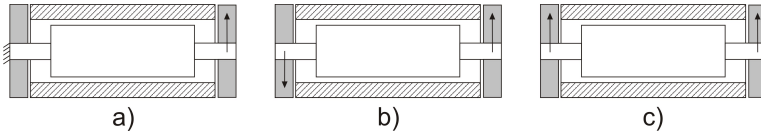


Figura 6.11: Modos de imposição de excentricidade nas máquinas síncronas da bancada.

Ao contrário do que ocorre para o caso de falta apresentado na seção anterior, a imposição de excentricidades provoca, para a máquina em estudo, comportamentos irregulares na modificação das amplitudes de sub-harmônicas, como pode ser observado no conjunto de resultados das figuras 6.12, 6.13 e 6.14.

Cada um destes modos proporciona tendências e taxas de variação distintas. Tomando primeiramente o modo de operação a) (Figura 6.12), observa-se que as componentes em 15 Hz e 30 Hz têm um acréscimo próximo de 1,5 dBV ao operar com 12,5% de excentricidade, valor que se mantém para o caso de 25% de excentricidade. No entanto, ao operar com 50% de excentricidade há um acréscimo pronunciado, elevando o valor de ambas as componentes em 4,5 dBV. A sub-harmônica de 45 Hz não sofre alteração com a máquina funcionando com 12,5% de excentricidade, mas decresce em amplitude 2,5 dBV ao passar para 25%, valor que se mantém para 50% de excentricidade.

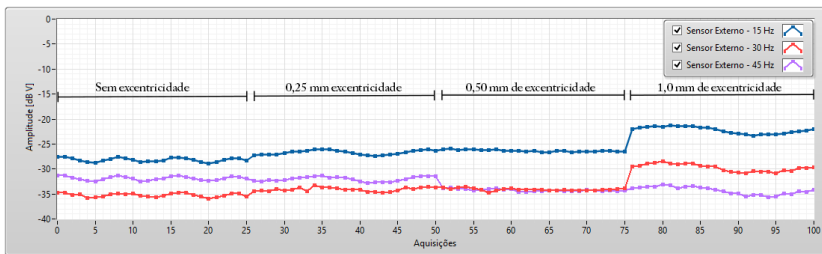


Figura 6.12: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta, para o modo excêntrico a) da Figura 6.11.

No segundo caso de operação imposto, o comportamento também não apresentou regularidade na alteração das amplitudes. Como se pode observar na Figura 6.13, as componentes em 15 e 45 Hz têm modificações de amplitudes na passagem de um valor de excentricidade para outro, porém dentro da faixa de oscilação da grandeza. Contudo, a componente de 30 Hz diminui seu valor em 2 dBV na operação em

12,5% e 25% de excentricidade. Mas ao operar com 50% de excentricidade, a componente de 30 Hz inverte a tendência e aumenta sua amplitude em 3 dBV.

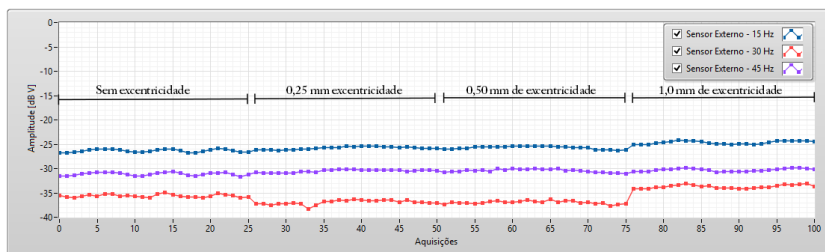


Figura 6.13: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta, para o modo excêntrico b) da Figura 6.11

Para o último dos três casos avaliados houve, mais uma vez, alterações irregulares de amplitude entre as componentes e também em relação aos casos anteriores. A sub-harmônica de 15 Hz não teve alteração de amplitude para os três valores de excentricidade. A componente de 30 Hz teve alteração apenas quando a excentricidade foi de 50%, diminuindo seu valor em 3dBV. Já para a componente de 45 Hz há alterações na passagem de um valor de excentricidade para outro, no entanto dentro da margem de desvio padrão provocado pela oscilação mecânica do sistema, de forma que a princípio pode ser confundido com a mesma.

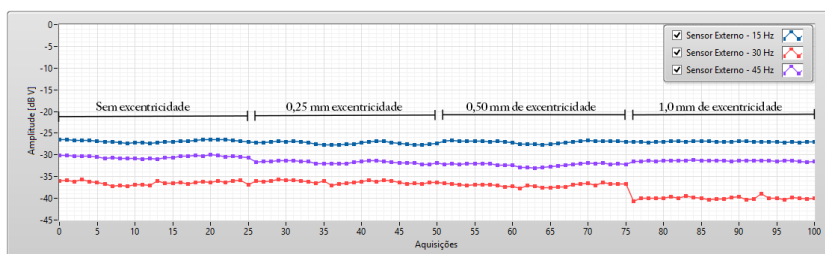


Figura 6.14: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta, para o modo excêntrico c) da Figura 6.11.

Contudo, embora as alterações sejam de pequena magnitude para todos os casos avaliados, é clara a alteração de amplitude média das sub-harmônicas para um novo patamar, constituindo assim uma assinatura

magnética detectável.

Ainda uma outra maneira de verificar esta assinatura magnética é pela observação do comportamento de cada ordem de sub-harmônica em conjunto. Por exemplo, as figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam os valores de amplitude das componentes de 15 Hz, 30 Hz e 45 Hz, respectivamente. Neste grupo de resultados, verifica-se que o método de avaliação de faltas proposto permite detectar o defeito e mesmo diferenciar entre os modos de operação excêntrica da máquina. Para pequenos valores de excentricidade as alterações de amplitude são também diminutas, enquanto que para excentricidades de 50%, pelo menos uma das componentes sub-harmônicas tem uma alteração mais proeminente.

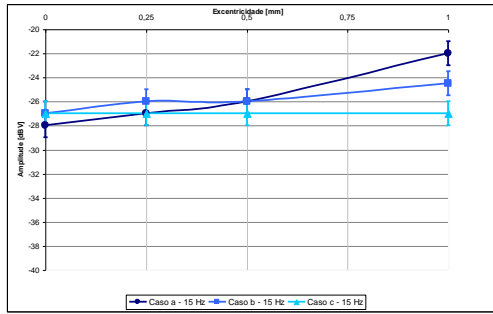


Figura 6.15: Curva de tendência do valor médio da sub-harmônica de 15 Hz para os três casos apresentados na Figura 6.11.

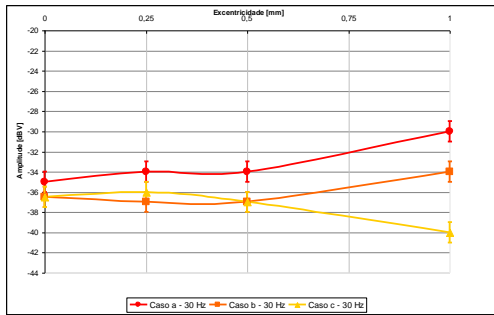


Figura 6.16: Curva de tendência do valor médio da sub-harmônica de 30 Hz para os três casos apresentados na Figura 6.11.

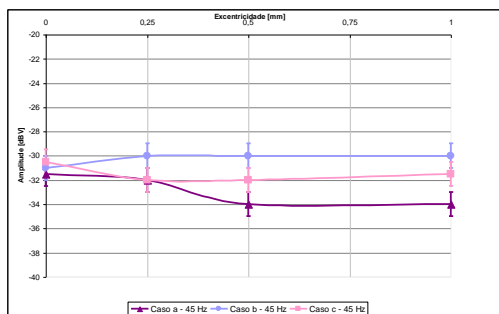


Figura 6.17: Curva de tendência do valor médio da sub-harmônica de 45 Hz para os três casos apresentados na Figura 6.11.

## 6.5 Detecção de Curto-Circuitos Entre Lâminas do Núcleo

Na bancada de testes a simulação de um curto-circuito entre lâminas de núcleo do estator é facilmente implementada pelo fechamento do circuito da espira mostrada na Figura 5.7, ao qual se tem acesso na caixa de ligações da máquina. Usando o mesmo procedimento dos ensaios anteriores, o sensor posicionado sobre a carcaça do gerador mede o fluxo externo, neste caso, em duas condições de operação: sem e com curto-circuito em uma região do estator.

A Figura 6.18 apresenta o histórico da medição de amplitude das três componentes sub-harmônicas. Nota-se que ao se impor a falta, há um ligeiro acréscimo no valor das componentes de 15 Hz e 45 Hz em aproximadamente 1 dBV, enquanto que a sub-harmônica de 30 Hz não é alterada.

Esta leve modificação nas componentes de 15 Hz e 45 Hz estão dentro da faixa de oscilação da medição. Embora haja indício de que a falta provoque alterações no fluxo externo, os resultados alcançados com as condições disponíveis neste estudo não são conclusivos.

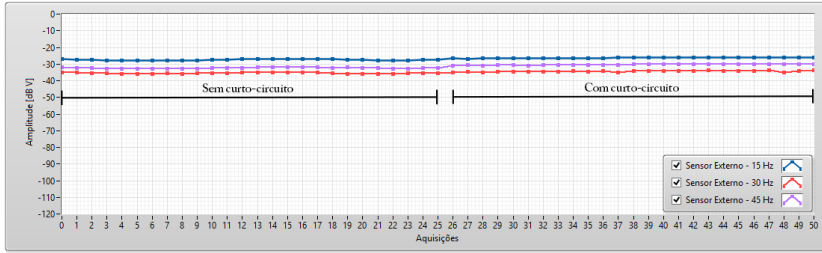


Figura 6.18: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta, para o defeito de curto-circuito entre lâminas do núcleo estatórico.

## 6.6 Detecção de Curto-Circuitos no Enrolamento de Armadura

O último teste de faltas implementado para avaliar a metodologia proposta foi realizado de maneira semelhante ao ensaio descrito na Seção 6.3. Neste experimento também são retiradas espiras de uma bobina de uma fase do enrolamento por meio de taps, como indicado na Figura 5.5. O resultado do teste aparece na Figura 6.19, onde se pode observar que as alterações de amplitude das sub-harmônicas são pouco expressivas, em comparação com o resultado para simulação de curto-circuito no enrolamento de campo.

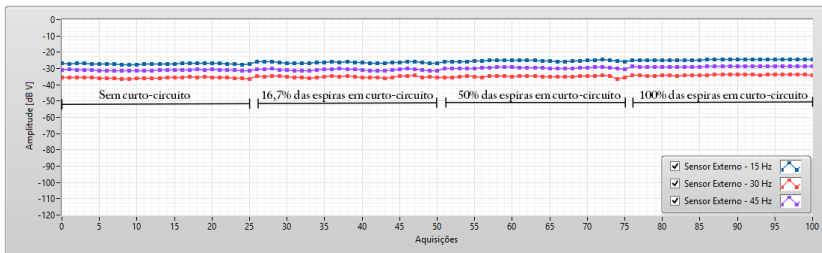


Figura 6.19: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta de curto-circuito em um enrolamento de armadura.

De forma a melhor visualizar os efeitos desta falta nas variáveis sob análise, as figuras 6.20 e 6.21 mostram, respectivamente, a mesma aquisição anterior porém em uma escala ampliada, e a curva de tendência



de cada uma das componentes.

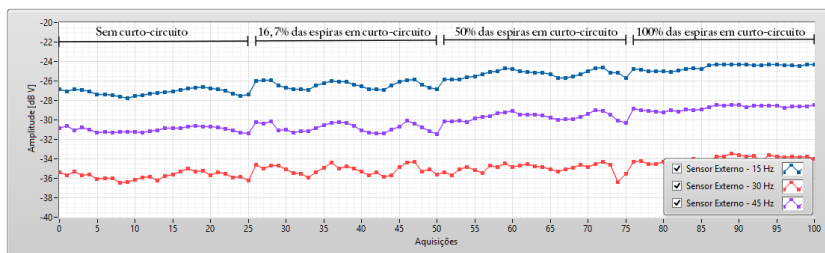


Figura 6.20: Variação de amplitudes das componentes sub-harmônicas em função da severidade da falta.

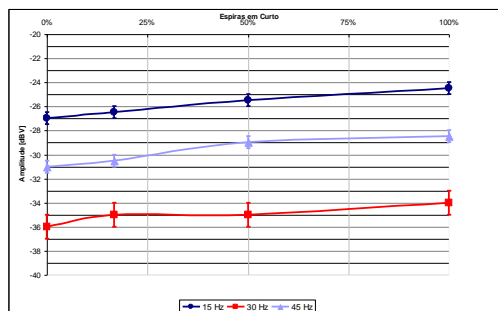


Figura 6.21: Curva de tendência do valor médio das sub-harmônicas de 15 Hz, 30 Hz e 45 Hz para três valores de curto-circuito em uma das bobinas de uma fase do estator.

Para este tipo de falta, todas as três componentes apresentam uma tendência regular de aumento em amplitude, porém com uma pequena taxa de variação. Pela Figura 6.21 se observa mais facilmente que a sub-harmônica de 15 Hz tem amplitude de -27 dBV para o caso considerado sadio e aumenta seu valor gradativamente até -24,5 dBV para 100% das espiras retiradas. Mesmo considerando o desvio padrão do valor médio da medição, neste caso 0,5 dBV, o aumento de 2,5 dBV entre os extremos do teste tornam evidente a sensibilidade do método também para este tipo de defeito em máquinas síncronas.

A mesma tendência se verifica para a componente de 30 Hz, variando de -36 dBV a -34 dBV entre os casos sadio e 100% das espiras em curto-circuito, e também para a sub-harmônica de 45 Hz que varia 2,5 dBV

entre os dois casos.

## 6.7 Considerações Finais do Capítulo

Apesar de algumas contingências alheias ao trabalho de tese não terem permitido uma exploração maior das possibilidades de ensaios com todo o aparato construído, os resultados obtidos foram exitosos nos testes de comportamento da grandeza escolhida quanto aos métodos de instalação, ruídos ambientes, e sua sensibilidade na detecção e avaliação de faltas.

Verificou-se que o nível de carga utilizada modifica a amplitude das componentes sub-harmônicas do campo externo, comportamento que pode ser aprofundado em pesquisas futuras para maiores valores de carga. Este acréscimo de carga deve proporcionar alterações de fluxos magnéticos que podem favorecer a detecção de defeitos como curto-circuitos de núcleo e enrolamento estatórico.

Os estudos do Capítulo 3 mostraram que o aumento da assimetria da forma de onda do fluxo no entreferro leva a um acréscimo na amplitude das sub-harmônicas e inter-harmônicas associadas. Esta característica foi verificada para a maioria das faltas aqui analisadas de forma experimental. Contudo, nos experimentos de detecção de excentricidades o espectro do campo magnético externo não obedeceu a esta tendência, mostrando que a composição do fluxo nestes casos deve possuir ainda outras características não contempladas no atual estágio desta pesquisa.

## Capítulo 7

# Conclusão e Propostas de Continuidade da Pesquisa

O contexto e as motivações que embasaram e nortearam o trabalho foram apresentados nos dois primeiros capítulos da tese. Uma revisão do Estado da Arte revelou que técnicas de detecção de faltas em máquinas elétricas por meio de campos magnéticos internos e externo há muitos anos vêm sendo desenvolvidas e aplicadas. Vários trabalhos importantes têm elaborado modelos e métodos que permitem prever e observar o comportamento de diversas faltas através de formas de onda no domínio do tempo, ou mais comumente, por meio de análise harmônica e do espectro de frequências do campo. Com respeito aos motores de indução, talvez por serem os mais utilizados na indústria, são as máquinas que mais têm atraído pesquisas com relação a detecção de faltas. A vasta maioria dos trabalhos procura identificar barras quebradas, embora haja também pesquisas considerando excentricidades e curto-circuitos em enrolamentos. Por sua vez, mesmo após décadas de pesquisas na área, a detecção de faltas em máquinas síncronas através do campo externo tem sido pouco discutida na literatura, principalmente em relação a máquinas de grande potência. Talvez um dos entraves a este tipo de pesquisa seja a dificuldade de acesso a estes equipamentos. Assim, esta tese focou esforços na tentativa de contribuir técnica e cientificamente para área industrial tão importante.

Optou-se então por utilizar análises do espectro do campo magnético externo, por ser uma técnica não invasiva e conseqüentemente mais facilmente aceita por fabricantes, equipes de manutenção, seguradoras e proprietários de máquinas elétricas. Dentre as variáveis de análise

escolheram-se as componentes de frequência da região sub-síncrona, por ser esta uma faixa do espectro menos susceptível a interferências e atenuações. A natureza destas componentes em máquinas síncronas foi estudada no Capítulo 3, onde se demonstrou que uma assimetria na forma de onda do fluxo de entreferro, por menor que seja, provoca a modulação da frequência elétrica pela frequência mecânica de rotação, levando ao surgimento destas componentes. Simulações numéricas mostram que estas variam em amplitude significativamente conforme cresce a distorção do fluxo. Um dos resultados imediatos dessa avaliação é que além possibilitar a detecção e o acompanhamento da evolução de faltas, esta técnica pode ser empregada para controle de qualidade na fabricação ou remontagem de máquinas após manutenção. Uma limitação da técnica, contudo, é que somente pode ser aplicada em máquinas com dois ou mais pares de polos, uma vez que para apenas um par de polos as velocidades elétricas e mecânicas são iguais.

A instrumentação para medição e análise de campos magnéticos de baixa amplitude, com exceção do conversor analógico/digital, foi totalmente desenvolvida e aprimorada no GRUCAD, neste trabalho de tese e por outros trabalhos associados de pós-graduação. Sob este aspecto, presume-se que a exposição detalhada do instrumento de medição venha a ser uma divulgação importante, haja vista que poucas referências descrevem todo o processo de aquisição, e que a quase totalidade dos estudos de medição de campos externos utiliza instrumentos comerciais. Aliás, no sistema desenvolvido obteve-se um erro aferido de leitura bastante reduzido,  $\varepsilon < 5\%$  para  $1,25 \mu\text{T}$  a  $5 \text{ Hz}$ , e boa imunidade eletromagnética, o que permitiu sua utilização em ambientes industriais com bom desempenho, como é mostrado em algumas medidas apresentadas no Apêndice D.

Algumas características técnicas do sistema de medição o tornam adequado para aplicações em campo. A primeira delas é a utilização direta do espectro da tensão terminal do sensor, evitando as distorções de nível contínuo provocadas pela operação de integração do sinal, permitindo leituras mais estáveis. Outra característica interessante é a utilização de apenas um sensor, que aliada à boa sensibilidade e precisão do sistema, permite que um operador possa fazer leituras periódicas para manutenção preventiva de forma rápida e totalmente não invasiva – como por exemplo nos casos apresentados no Apêndice D, em que medições são tomadas pelo lado externo do compartimento de isolamento a gás de geradores síncronos. Uma terceira funcionalidade a ser citada é a implementação de uma função alarme no software de análise de dados, a qual pode ser empregada em uma instalação fixa do sistema

para monitoramento *online* e gerar eventos ante qualquer alteração da assinatura magnética da máquina.

Sendo necessário um equipamento para a realização de experimentos controlados a fim de validar a metodologia desenvolvida, uma bancada de testes foi especificada e construída para a simulação não destrutiva das faltas mais comuns em máquinas síncronas. Com ela foi possível verificar de forma criteriosa parte do comportamento das componentes sub-harmônicas do campo magnético interno e externo, de acordo com informações disponíveis na literatura ou com as previsões feitas pelos estudos dos capítulos 2 e 3.

A construção desta bancada, bem como a compra de parte dos materiais utilizados para o desenvolvimento do sistema de medição, foi financiada pelo Programa de Fomento da ANEEL para Pesquisa & Desenvolvimento no Setor Elétrico Brasileiro, viabilizando assim muitos dos resultados técnicos e científicos deste trabalho. A parceria com a empresa de geração Tractebel Energia S.A. além de possibilitar a obtenção dos recursos do Programa (que muito dificilmente poderiam ser conseguidos com outra fonte de financiamento nacional), também permitiu que testes desta metodologia fossem realizados em geradores reais, algo que não se encontrou semelhança em todas as consultas na literatura feitas durante a execução desta tese. Este rápido posfácio pretende portanto mostrar a importância fundamental deste tipo de colaboração entre Universidade, como instituição de pesquisa geradora de conhecimento, e a Indústria, como instituição produtora de riqueza, para que seja uma variável real na equação do desenvolvimento da Nação – bem como para proporcionar que, ao menos em parte, nem a Indústria precise importar soluções para seus problemas e nem a Universidade exportar os seus conhecimentos ou guardá-los na prateleira.

Na última etapa da tese foram conduzidos ensaios com a nova bancada, utilizando a máquina síncrona de oito polos. Destes experimentos conclui-se que: i) a utilização de um único sensor de campo magnético externo, associado ao sistema de aquisição e tratamento de dados desenvolvido, é uma metodologia viável para a avaliação da condição de operação de máquinas elétricas, conforme os resultados expostos nos capítulos 4 e 5 e nos apêndices B, C e D; ii) a avaliação de faltas pela monitoração da amplitude das componentes sub-harmônicas é confiável como parâmetro de identificação de curto-circuitos nos enrolamentos de campo e de armadura, bem como para excentricidade estática; iii) os estudos do comportamento do espectro de formas de onda com assimetrias discutidos no Capítulo 3 fornecem uma interpretação dos resultados experimentais, porém precisam ser aprofundados uma vez que

para algumas condições de assimetria por excentricidade a amplitude de determinadas componentes decresceu; iv) embora tenha sido possível detectar curto-circuitos estatóricos com a componentes tangencial do campo externo, os estudos de Zidat et al. apontam que talvez uma melhor estratégia seja monitorar os fluxos nas regiões de cabeça de bobina; v) os ensaios com a bancada indicam que é necessário considerar o nível da carga a que está submetido o gerador, ao menos até o valor testado, pois ainda que sua influência tenha sido pequena nestes experimentos, em alguns casos, como para curto-circuitos de estator, ela pode ser importante.

Com o exposto, acredita-se que a meta principal desta tese – desenvolver e avaliar o desempenho um sistema que possibilite a obtenção de informações contidas no campo magnético externo de motores de indução e, principalmente, geradores síncronos, visando identificar possíveis faltas elétricas ou mecânicas nestas máquinas de modo não invasivo – tenha sido atingida.

Algumas outras propostas para melhorias e continuidade da pesquisa são enumeradas a seguir:

- i) Estudar a possibilidade de diferenciação de faltas quando duas ou mais ocorrerem simultaneamente;
- ii) Desenvolver uma ferramenta de análise de defeitos com algoritmo inteligente, que utilizando outras métricas e levando em consideração o ponto de operação da máquina possa fornecer de forma automatizada diagnósticos e prognósticos diretamente às equipes de manutenção;
- iii) Realizar testes de longo prazo em máquinas reais, a fim de coletar dados de longas séries temporais, englobando assim vários modos de operação das MSs e, eventualmente, detectando alguma falta incipiente;
- iv) Utilizar sensores em outras regiões externas da máquina elétrica visando melhorar a sensibilidade do método à detecção de faltas como curto-circuitos de armadura e de chapas do núcleo estatórico;
- v) Estudar o fenômeno da ressonância sub-síncrona da barra infinita e suas implicações para esta metodologia de detecção de faltas;
- vi) Interpretar a relação entre o espectro do campo magnético externo e da corrente de neutro de máquinas síncronas, para talvez encontrar nova fonte de informação sobre faltas nestas máquinas.

## Apêndice A

# Estudo de forma de onda com Assimetria

Para o cálculo da Série de Fourier da forma de onda apresentada na Figura 3.1, emprega-se a definição trigonométrica padrão

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \left[ \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_m t) + B_k \text{sen}(k\omega_m t) \right] \quad (\text{A.1})$$

O termo que representa o valor médio da função é  $\frac{A_0}{2}$ , e seu valor é definido por A.2, calculado conforme a seguir.

$$A_0 = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} g(t) dt \quad (\text{A.2})$$

Substituindo  $g(t)$  pela soma das funções 3.3, levando em conta as relações 3.1 e 3.2, resulta em A.3.

$$A_0 = \frac{1}{pT_e} \left( \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \text{sen}(\omega_e t) dt + \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \text{sen}(\omega_e t) dt \right) \quad (\text{A.3})$$

Para facilitar o entendimento dos cálculos, calculam-se as integrais de maneira separada por A.4 e A.5, assim como será feito também para os outros coeficientes da Série de Fourier  $A_k$  e  $B_k$ .

$$I_{A_0} = \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) dt \quad (\text{A.4})$$

$$II_{A_0} = \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) dt \quad (\text{A.5})$$

Para  $I_{A_0}$ , vem

$$\begin{aligned} I_{A_0} &= \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) dt \\ &= \left[ -\frac{b \cos(\omega_e t)}{\omega_e} \right]_0^{\frac{T_e}{2}} \\ &= -\frac{b \cos\left(\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\omega_e} + \frac{b \cos(0)}{\omega_e} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Como  $\omega_e T_e = 2\pi$ ,

$$\begin{aligned} I_{A_0} &= -\frac{b \cos(\pi)}{\omega_e} + \frac{b \cos(0)}{\omega_e} \\ &= \frac{2b}{\omega_e} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Fazendo o cálculo de  $II_{A_0}$ , tem-se

$$\begin{aligned} II_{A_0} &= \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) dt \\ &= \left[ -\frac{B \cos(\omega_e t)}{\omega_e} \right]_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} \\ &= -\frac{B \cos(p\omega_e T_e)}{\omega_e} + \frac{B \cos\left(\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\omega_e} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Como  $p$  é um inteiro e  $\omega_e T_e = 2\pi$ ,



$$\begin{aligned}
II_{A_0} &= -\frac{B \cos(2\pi)}{\omega_e} + \frac{B \cos(\pi)}{\omega_e} \\
&= \frac{B(-1-1)}{\omega_e} \\
&= \frac{-2B}{\omega_e}
\end{aligned} \tag{A.9}$$

Juntando os resultado das duas integrais de A.3, resulta o valor de  $A_0$  dado por A.10, isto é, o valor contínuo da série.

$$\begin{aligned}
A_0 &= \frac{2}{pT_e\omega_e} (b - B) \\
&= \frac{1}{p\pi} (b - B)
\end{aligned} \tag{A.10}$$

Passa-se a apresentar agora o cálculo de  $A_k$ .

$$\begin{aligned}
A_k &= \frac{2}{T_m} \int_0^{T_m} f(t) \cos(k\omega_m t) dt \\
&= \frac{2}{pT_e} \left( \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt + \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \right)
\end{aligned} \tag{A.11}$$

Resolve-se de maneira separada as integrais conforme A.12 e A.13.

$$I_{A_k} = \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \tag{A.12}$$

$$II_{A_k} = \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \tag{A.13}$$

Na resolução destas integrais A.12 e A.13, há uma particularidade para o caso em que  $k = p$ , isto é, quando o multiplicador da frequência tem o valor do número de pares de polos, o que corresponde à frequência da fundamental elétrica. Primeiramente será analisado o caso em que  $p = k$ , e posteriormente para valores de  $k$  diferentes de  $p$ . Para a primeira integral de A.11, tem-se

$$\begin{aligned}
I_{A_k} &= \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos(\omega_e t) dt \\
&= \left[ \frac{-b}{4\omega_e} \cos(2\omega_e t) \right]_0^{\frac{T_e}{2}} \\
&= \frac{-b}{4\omega_e} \left[ \cos\left(\frac{2\omega_e T_e}{2}\right) - \cos(0) \right] \\
&= \frac{-b}{4\omega_e} [\cos(2\pi) - \cos(0)] = 0
\end{aligned} \tag{A.14}$$

Para a segunda integral de A.11, tem-se

$$\begin{aligned}
II_{A_k} &= \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos(\omega_e t) dt \\
&= \left[ \frac{-B}{4\omega_e} \cos(2\omega_e t) \right]_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} \\
&= \frac{-B}{4\omega_e} \left[ \cos(2p\omega_e T_e) - \cos\left(\frac{2\omega_e T_e}{2}\right) \right] \\
&= \frac{-B}{4\omega_e} [\cos(4p\pi) - \cos(2\pi)] = 0
\end{aligned} \tag{A.15}$$

Assim, o valor de  $A_k$  para  $k = p$  são nulos. Para valores de  $k$  e  $p$  não iguais, tem-se o seguinte cálculo:

$$\begin{aligned}
I_{A_k} &= \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \\
&= -b \left[ \frac{\cos\left((\omega_e - \frac{\omega_e k}{p})t\right)}{2(\omega_e - \frac{\omega_e k}{p})} + \frac{\cos\left((\omega_e + \frac{\omega_e k}{p})t\right)}{2(\omega_e + \frac{\omega_e k}{p})} \right]_0^{\frac{T_e}{2}} \\
&= \frac{-b}{2} \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\omega_e t\right)}{\omega_e(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\omega_e t\right)}{\omega_e(1 + \frac{k}{p})} \right]_0^{\frac{T_e}{2}} \\
&= \frac{-b}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\omega_e \frac{T_e}{2}\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\omega_e \frac{T_e}{2}\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] - \left[ \frac{\cos(0)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos(0)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{A.16}$$

Simplificando A.16 com a aplicação do mínimo múltiplo comum dado por A.17, tem-se A.18.

$$\left(1 - \frac{k}{p}\right) \left(1 + \frac{k}{p}\right) = \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right) \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned} I_{A_k} &= \frac{-b}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] - \left[ \frac{\left(1 + \frac{k}{p}\right) + \left(1 - \frac{k}{p}\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \right\} \\ &= \frac{-b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left\{ \left[ \left(1 + \frac{k}{p}\right) \cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right) + \left(1 - \frac{k}{p}\right) \cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right) \right] - 2 \right\} \\ &= \frac{b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ 2 - \cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right) \left(1 + \frac{k}{p} + 1 - \frac{k}{p}\right) \right] \\ &= \frac{b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ 2 - \cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right) (2) \right] \\ &= \frac{b}{\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ 1 - \cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right) \right] \quad (\text{A.18}) \end{aligned}$$

Ao multiplicar o numerador e o denominador por  $p^2$ , incluindo a relação A.19, tem-se A.20.

$$\cos\left(\left(1 \pm \frac{k}{p}\right)\pi\right) = -\cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) \quad (\text{A.19})$$

$$I_{A_k} = \frac{bP^2}{\omega_e (p^2 - k^2)} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right] \quad (\text{A.20})$$

Para a parcela  $II_{A_k}$ , tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
II_{A_k} &= \int_{\frac{T_e}{2}}^{PT_e} B \operatorname{sen}(\omega_e t) \cos\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \\
&= \frac{-B}{2\omega_e} \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\omega_e t\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\omega_e t\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right]_{\frac{T_e}{2}}^{PT_e} \\
&= \frac{-B}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\omega_e p T_e\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\omega_e p T_e\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right. \\
&\quad \left. - \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right\} \\
&= \frac{-B}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})2P\pi\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})2P\pi\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right. \\
&\quad \left. - \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right\} \quad (A.21)
\end{aligned}$$

A parte dos argumentos dos dois primeiros cossenos são multiplicadas por  $p$ , colocando-o em evidência.

$$\begin{aligned}
II_{A_k} &= \frac{-B}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\cos\left((p-k)2\pi\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((p+k)2\pi\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right. \\
&\quad \left. - \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right\} \\
&= \frac{-B}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{1}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{1}{(1 + \frac{k}{p})} \right] - \left[ \frac{\cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 - \frac{k}{p})} + \frac{\cos\left((1 + \frac{k}{p})\pi\right)}{(1 + \frac{k}{p})} \right] \right\} \quad (A.22)
\end{aligned}$$

Aplicando o mínimo múltiplo comum entre os termos, tem-se

$$\begin{aligned}
II_{A_k} &= \frac{-B}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ \left(1 + \frac{k}{p}\right) + \left(1 - \frac{k}{p}\right) - 2 \cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right) \right] \\
&= \frac{-B}{\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ \left(1 - \cos\left((1 - \frac{k}{p})\pi\right)\right) \right] \quad (A.23)
\end{aligned}$$

Multiplica-se tanto o denominador quanto o numerador por  $p^2$ , e manipula-se o cosseno em A.23, resultando A.24.

$$II_{A_k} = \frac{-Bp^2}{\omega_e(p^2 - k^2)} \left[ \left(1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right)\right) \right] \quad (\text{A.24})$$

Com os resultados dados por A.20 e A.24, determina-se os valores de  $A_k$ .

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{2}{pT_e} (I_{A_k} + II_{A_k}) \\ &= \frac{2}{pT_e} \left( \frac{bP^2}{\omega_e(p^2 - k^2)} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right] + \frac{-BP^2}{\omega_e(p^2 - k^2)} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right] \right) \\ &= \frac{2p^2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right]}{p2\pi(p^2 - k^2)} (b - B) \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Sendo

$$1 + \cos\left(\frac{\pi k}{p}\right) = 2\cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \quad (\text{A.26})$$

tem-se

$$A_k = \frac{p}{\pi(p^2 - k^2)} \left[ 2\cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \right] (b - B) \quad (\text{A.27})$$

Assim, os valores de  $A_k$  são dados por A.28

$$A_k = \begin{cases} \text{zero, para } k = p \\ \frac{P}{\pi(p^2 - k^2)} \left[ 2\cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \right] (b - B), \text{ para } k \neq p \end{cases} \quad (\text{A.28})$$

A seguir, calculam-se os valores dos coeficientes  $B_k$  da Série de Fourier, definindo-se as relações A.30 e A.31.

$$B_k = \frac{2}{pT_e} \left( \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \text{sen}(\omega_e t) \text{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt + \int_{\frac{T_e}{2}}^{T_m} B \text{sen}(\omega_e t) \text{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \right) \quad (\text{A.29})$$

$$I_{B_k} = \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \text{sen}(\omega_e t) \text{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \quad (\text{A.30})$$

$$II_{B_k} = \int_{\frac{T_e}{2}}^{T_m} B \text{sen}(\omega_e t) \text{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \quad (\text{A.31})$$

Na resolução destas integrais acima, novamente há uma particularidade para  $p$  igual a  $k$ , e para valores de  $k$  diferentes de  $p$ . Primeiramente, analisa-se o caso em que  $k = p$ .

$$\begin{aligned}
 I_{B_k} &= \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}^2(\omega_e t) dt \\
 &= b \left[ \frac{t}{2} - \frac{\operatorname{sen}(2\omega_e t)}{4\omega_e} \right]_0^{T_e} \\
 &= b \left\{ \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{\operatorname{sen}(\frac{2\omega_e T_e}{2})}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{0}{2} - \frac{\operatorname{sen}(0)}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= b \left\{ \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{\operatorname{sen}(2\pi)}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{0}{2} - \frac{\operatorname{sen}(0)}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= b \left\{ \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{0}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{0}{2} - \frac{0}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= \frac{bT_e}{4}
 \end{aligned} \tag{A.32}$$

$$\begin{aligned}
 II_{B_k} &= \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \operatorname{sen}^2(\omega_e t) dt \\
 &= B \left\{ \left[ \frac{pT_e}{2} - \frac{\operatorname{sen}(2\omega_e pT_e)}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{\operatorname{sen}(\frac{2\omega_e pT_e}{2})}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= B \left\{ \left[ \frac{pT_e}{2} - \frac{\operatorname{sen}(2\omega_e pT_e)}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{\operatorname{sen}(\frac{2\omega_e pT_e}{2})}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= B \left\{ \left[ \frac{pT_e}{2} - \frac{\operatorname{sen}(2\pi)}{4\omega_e} \right] - \left[ \frac{T_e}{4} - \frac{\operatorname{sen}(2\pi)}{4\omega_e} \right] \right\} \\
 &= B \left\{ \left[ \frac{pT_e}{2} - 0 \right] - \left[ \frac{T_e}{4} - 0 \right] \right\} \\
 &= B \left[ \frac{pT_e}{2} - \frac{T_e}{4} \right]
 \end{aligned} \tag{A.33}$$

Juntando-se os dois resultados do cálculo das duas integrais conforme A.34, tem-se A.35.

$$B_k = \frac{2}{pT_e} \{I_{B_k} + II_{B_k}\} \tag{A.34}$$

$$\begin{aligned}
B_k &= \frac{2}{pT_e} \left\{ \frac{bT_e}{4} + B \left[ \frac{pT_e}{2} - \frac{T_e}{4} \right] \right\} \\
&= \frac{1}{2p} \{b + B[2p - 1]\}
\end{aligned} \tag{A.35}$$

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento para  $k \neq p$ .

$$\begin{aligned}
I_{B_k} &= \int_0^{\frac{T_e}{2}} b \operatorname{sen}(\omega_e t) \operatorname{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{P}\right) dt \\
&= \frac{b}{2\omega_e} \left[ \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\omega_e t\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\omega_e t\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right]_0^{\frac{T_e}{2}} \\
&= \frac{b}{2\omega_e} \left\{ \begin{aligned} &\left[ \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \\ &- \left[ \frac{\operatorname{sen}(0)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\operatorname{sen}(0)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \end{aligned} \right\} \\
&= \frac{b}{2\omega_e} \left\{ \left[ \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\operatorname{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] - [0 - 0] \right\}
\end{aligned} \tag{A.36}$$

Aplicando o mínimo múltiplo comum entre os termos, tem-se A.37.

$$\begin{aligned}
I_{B_k} &= \frac{b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ \begin{aligned} &\left(1 + \frac{k}{p}\right) \operatorname{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\pi\right) \\ &- \left(1 - \frac{k}{p}\right) \operatorname{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\pi\right) \end{aligned} \right] \\
&= \frac{b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ \left(1 + \frac{k}{p}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) + \left(1 - \frac{k}{p}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right] \\
&= \frac{b}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ (2) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) \right]
\end{aligned} \tag{A.37}$$

Multiplicando tanto o denominador quanto o numerador em A.37 por  $p^2$ , tem-se A.38.

$$I_{B_k} = \frac{bP^2}{\omega_e (p^2 - k^2)} \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \quad (\text{A.38})$$

Na sequência, calcula-se a parcela  $II_{B_k}$

$$\begin{aligned} II_{B_k} &= \int_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} B \text{sen}(\omega_e t) \text{sen}\left(\frac{k\omega_e t}{p}\right) dt \\ &= \frac{B}{2\omega_e} \left[ \frac{\text{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\omega_e t\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\omega_e t\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right]_{\frac{T_e}{2}}^{pT_e} \\ &= \frac{B}{2\omega_e} \left\{ \begin{aligned} &\left[ \frac{\text{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\omega_e pT_e\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\omega_e pT_e\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \\ &- \left[ \frac{\text{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\frac{\omega_e T_e}{2}\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.39}) \end{aligned}$$

Como

$$\begin{aligned} \text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\omega_e pT_e\right) &= \text{sen}((p+k)\omega_e T_e) \\ &= \text{sen}((p+k)2\pi) \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

tem-se

$$\begin{aligned} II_{B_k} &= \frac{B}{2\omega_e} \left\{ \begin{aligned} &\left[ \frac{\text{sen}((p-k)2\pi)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}((p+k)2\pi)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \\ &- \left[ \frac{\text{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{B}{2\omega_e} \left\{ \begin{aligned} &\left[ \frac{\text{sen}(0)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}(0)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \\ &- \left[ \frac{\text{sen}\left(\left(1 - \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 - \frac{k}{p}\right)} - \frac{\text{sen}\left(\left(1 + \frac{k}{p}\right)\pi\right)}{\left(1 + \frac{k}{p}\right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.41}) \end{aligned}$$

Aplicando o mínimo múltiplo comum entre os termos, tem-se



$$II_{B_k} = \frac{B}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{k}{p}\right) \text{sen} \left( \left(1 - \frac{k}{p}\right) \pi \right) \\ - \left(1 - \frac{k}{p}\right) \text{sen} \left( \left(1 + \frac{k}{p}\right) \pi \right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.42})$$

e como

$$\text{sen} \left( \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pi \right) = \mp \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \quad (\text{A.43})$$

tem-se A.44

$$\begin{aligned} II_{B_k} &= \frac{B}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left\{ \left[ \left(1 + \frac{k}{p}\right) \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) + \left(1 - \frac{k}{p}\right) \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \right] \right\} \\ &= \frac{B}{2\omega_e \left(1 - \left(\frac{k}{p}\right)^2\right)} \left[ 2 \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

Multiplicando tanto o denominador quanto o numerador por  $p^2$ , tem-se

$$II_{B_k} = \frac{-Bp^2}{\omega_e (p^2 - k^2)} \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \quad (\text{A.45})$$

Somando os termos calculados conforme A.46,

$$B_k = \frac{2}{pT_e} (I_{B_k} + II_{B_k}) \quad (\text{A.46})$$

tem-se A.47.

$$\begin{aligned} B_k &= \frac{2}{pT_e} \left( \frac{bP^2}{\omega_e (p^2 - k^2)} \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) + \frac{-Bp^2}{\omega_e (p^2 - k^2)} \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) \right) \\ &= \frac{p}{\pi (p^2 - k^2)} \text{sen} \left( \frac{\pi k}{p} \right) (b - B) \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

Assim, os valor de  $B_k$  para os casos possíveis são dados por A.48.

$$B_k = \begin{cases} \frac{1}{2p} \{b + B[2p - 1]\} & \text{para } p = k \\ \frac{P}{\pi(P^2 - k^2)} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) (b - B), & \text{para } p \neq k \end{cases} \quad (\text{A.48})$$

Como resultado, a função que representa a forma de onda da Figura 3.1 é dada pela Série de Fourier por A.49 e A.50. Para o caso em que  $p = k$ , tem-se A.49. Nota-se que haverá uma componente contínua somada com senóides, com frequências múltiplas desde a fundamental mecânica até a de ordem  $k$ .

$$B(t) = \frac{(b - B)}{2p\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2p} \{b + B[2p - 1]\} \operatorname{sen}(k\omega_m t) \quad (\text{A.49})$$

E para o caso em que  $k$  seja diferente de  $p$ , tem-se A.50.

$$B(t) = \frac{(b - B)}{2p\pi} + \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{p(b - B)}{\pi(p^2 - k^2)} \left[ \begin{aligned} &2\cos^2\left(\frac{\pi k}{2p}\right) \cos(k\omega_m t) \\ &+ \operatorname{sen}\left(\frac{\pi k}{p}\right) \operatorname{sen}(k\omega_m t) \end{aligned} \right] \right] \quad (\text{A.50})$$

Se  $b$  for igual a  $B$ , a forma de onda dos períodos elétricos são iguais dentro de um giro da máquina. Neste caso, o valor da função A.50 é nulo, e o sistema é descrito por A.49 para  $k = p$ , onde só há uma raia de frequência dada por A.51.

$$\begin{aligned} B(t) &= 0 + \frac{1}{2p} 2pB \operatorname{sen}(p\omega_m t) \\ &= B \operatorname{sen}(\omega_e t) \end{aligned} \quad (\text{A.51})$$

## Apêndice B

# Medição de fluxo no entreferro para condições de operação com e sem defeito

São apresentadas neste apêndice formas de onda da tensão induzida em uma bobina-sonda instalada em um dente da máquina síncrona de 8 polos da bancada de testes, a qual é apresentada no Capítulo 5 (ver sonda #4 da Figura 5.10). O objetivo é ilustrar o aumento do fator de modulação que ocorre no campo do entreferro quando uma falta é imposta à máquina, corroborando as discussões do Capítulo 3 deste trabalho. Apresenta-se também o espectro de frequências para o caso em que a falta é mais severa.

O sinal da Figura B.1 é referente à MS operando em sua condição de fábrica, sem defeitos impostos, e sem carga. Para este caso tem-se  $b = 0,97B$ . Nas figuras B.2 e B.3 são exibidas as formas de onda da tensão induzida na sonda de entreferro para situações em que foram impostos defeitos no enrolamento de campo. Para o sinal da Figura B.2  $b = 0,92B$ , e no caso da Figura B.3  $b = 0,75B$ .

Por fim, o espectro da Figura B.4 mostra que mesmo para o caso de falta mais elevada, as harmônicas ímpares da fundamental elétrica não sofrem alteração em amplitude, ao contrário das demais, como discutido na Seção 3.1.

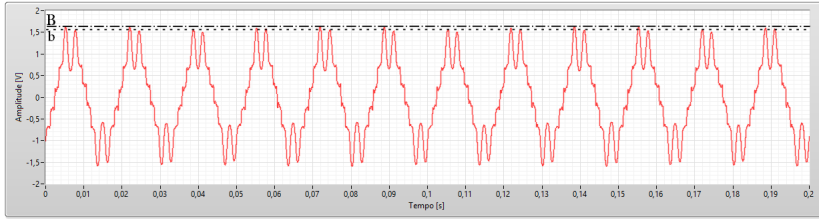


Figura B.1: Forma de onda da derivada do fluxo captado no entreferro para a máquina sadia, sem carga.

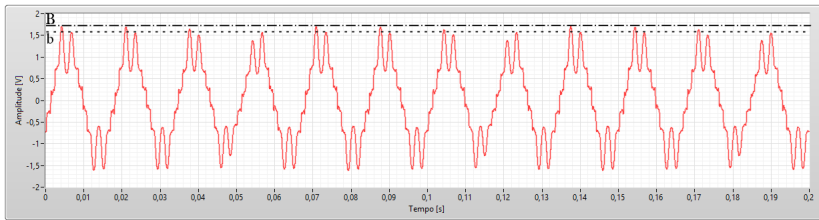


Figura B.2: Forma de onda da derivada do fluxo captado no entreferro para a máquina com 20% das da espiras de um polo, sem carga.

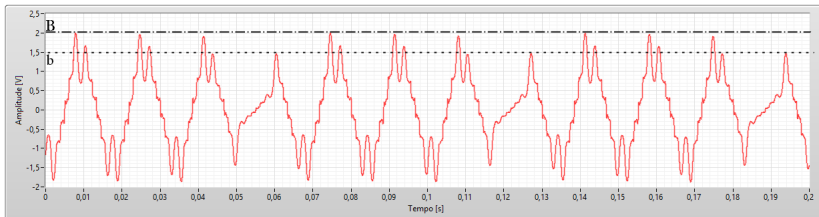


Figura B.3: Forma de onda da derivada do fluxo captado no entreferro para a máquina com um polo desalimentado, sem carga.

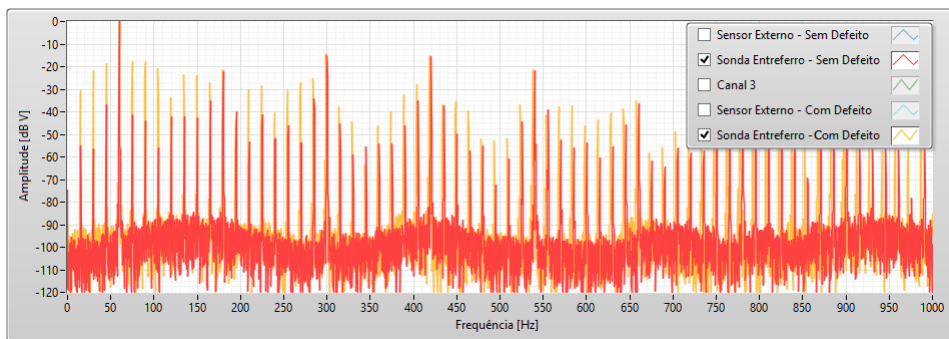


Figura B.4: Espectro do fluxo de entreferro para MS sadia e com um polo desalimentado, sem carga.



## Apêndice C

# Efeitos da vibração mecânica na medição de campos externos

Nos diversos resultados apresentados no Capítulo 6 é comentado que as variações observadas nas medições se devem à oscilações mecânicas. Isto ocorre devido à maneira como são feitas as aquisições, em que a amplitude de cada componente de frequência monitorada é adquirida para formar um histórico. O período de oscilação observado nestas medições é função do complexo sistema formado pela vibração mecânica do conjunto de máquinas elétricas, a fixação do sensor sobre a carcaça da máquina, e a taxa de leitura de dados utilizada pelo software.

Na bancada de ensaios, o controle de velocidade do motor de corrente contínua é feito manualmente pela variação de um reostato, o que limita a precisão com que se consegue ajustar a frequência nominal imposta aos geradores. Empiricamente constatou-se uma resolução de  $\pm 0,05$  Hz no ajuste da manopla do reostato. As medidas de frequência foram feitas com um frequencímetro marca Fluke, modelo 87V, com resolução de 0,001 Hz e precisão de  $\pm 0,005\%$ .

Para melhor exemplificar este efeito, duas séries de medições foram realizadas, adquirindo a amplitude da componente sub-harmônica de primeira ordem no gerador de polos salientes, a uma taxa de uma leitura por segundo. A primeira aquisição foi feita para a MS operando sem carga (Figura C.1), enquanto num segundo teste impôs-se uma carga de 56,25% de sua capacidade nominal (Figura C.2). Foram ajustadas

velocidades para cinco valores frequência elétrica terminal: 59,5 Hz, 59,9 Hz, 60,0 Hz, 60,1 Hz e 60,5 Hz.

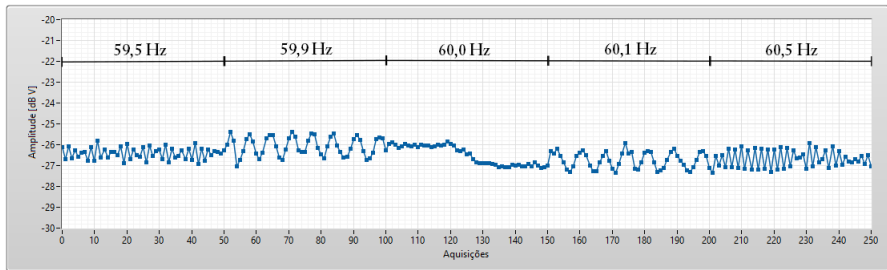


Figura C.1: Variação do período de oscilação da medição de campo magnético externo, provocada pela vibração mecânica do sistema bancada-sensor, para MS sem carga.

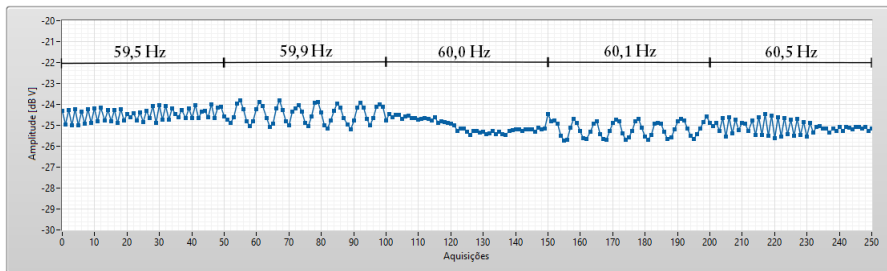


Figura C.2: Variação do período de oscilação da medição de campo magnético externo, provocada pela vibração mecânica do sistema bancada-sensor, para MS com carga.

Destes experimentos conclui-se que o período de oscilação do sistema varia consideravelmente para pequenas alterações de velocidade da máquina primária, quando próximo da velocidade nominal da máquina síncrona (900 rpm), tendendo a infinito em 60 Hz e também ao se afastar deste valor. Ressalta-se que estes valores não são, contudo, a exata frequência de oscilação do conjunto mecânico motor-gerador, uma vez que a fixação do sensor possui constantes elásticas que devem ser levadas em consideração, e que a taxa de leitura utilizada pode não ter resolução suficiente.

A imposição de carga não forneceu qualquer amortecimento às oscilações, alterando apenas a amplitude média da componente.



## Apêndice D

# Testes de campo em unidades geradoras de grande porte

Com o último aprimoramento do sistema de medição, foram feitas medições em duas plantas geradoras hidrelétricas. O objetivo foi avaliar as características do campo magnético mensurado dentro e fora do compartimento (também comumente chamado de *housing*) das máquinas síncronas, visando uma instalação permanente do equipamento para uma monitoração de longo prazo. Na mesma oportunidade, utilizando sensores bobina de Rogowski, foram medidas as correntes de saída dos geradores sobre a blindagem destes cabos, e também a corrente do cabo de aterramento das máquinas. Este apêndice apresenta alguns dos principais resultados obtidos.

Para demonstrar a confiabilidade da medição fornecida pelo equipamento desenvolvido, na primeira planta de geração foram medidos os campos magnéticos nas partes internas e externas do *housing* de um dos geradores, o qual possui 194,5 MVA e 60 polos, aqui denominado Gerador A. A Figura D.1 mostra a região de interesse do espectro, para os campos medidos com o sensor fixado nas paredes externa e interna do *housing* (uma chapa de material ferromagnético) e também na face acessível do estator da máquina. Pode-se notar que o conteúdo do espectro é semelhantes para as três medições, porém com algumas variações de amplitude entre os pontos de observação. Como esperado, em relação à medição realizada na parte interna, as amplitudes das com-

ponentes do campo medido pelo lado externo são um pouco menores. Ainda assim, uma conclusão importante deste experimento é que, com a sensibilidade do sistema desenvolvido, é possível obter uma imagem do fluxo sem mesmo ter de acessar seu compartimento. Fotografias das instalações são apresentadas nas figuras D.3 e D.4.

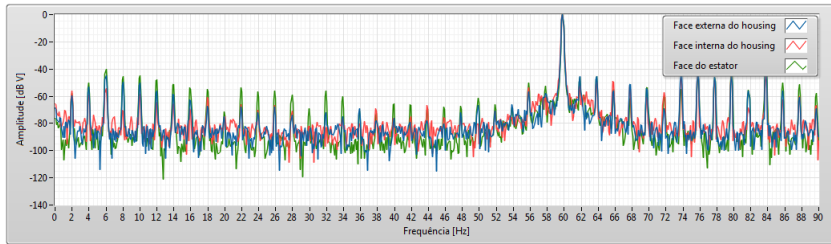


Figura D.1: Espectro da derivada do campo magnético dentro e fora do housing do gerador A.

Em outro experimento, foram comparados os espectros do campo magnético externo ao *housing* do Gerador A com o de outro gerador síncrono daquela instalação, denominado Gerador B, o qual conta com características construtivas de algumas de suas partes ativas diferentes das do primeiro. A máquina em questão possui 200 MVA e 60 polos. Observa-se pela Figura D.2 que as assinaturas espectrais dos geradores são significativamente diferentes, levando a uma clara identidade de cada máquina. Nestes testes os sensores foram posicionados em um mesmo ponto em referência a altura do pacote estatórico de cada gerador, os quais funcionavam sob uma mesma condição de operação.

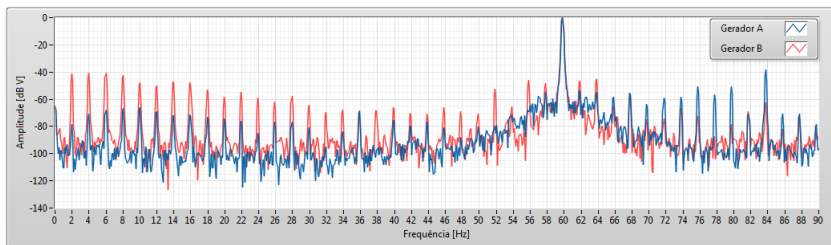


Figura D.2: Comparação do espectro da derivada do campo magnético externo aos housings dos geradores A e B.



Figura D.3: Medição na parte externa ao housing do gerador A.

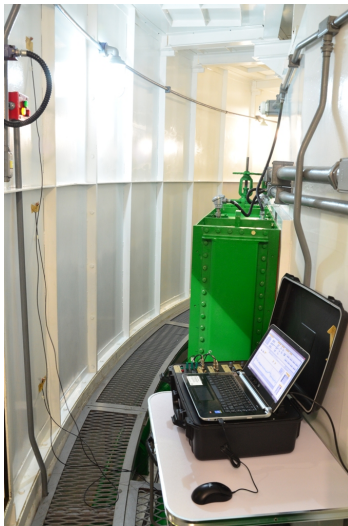


Figura D.4: Medição na parte interna ao housing do gerador A.

Na outra instalação hidrelétrica visitada foram avaliados dois geradores com potência de 350 MVA, 60 polos, e com *housing* construído

em concreto. O experimento de comparação de espectros dos campos externos e internos ao compartimento também foi realizado e é apresentado na Figura D.5 para o Gerador A desta usina. Diferentemente do caso anterior, para esta máquina as componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas têm praticamente a mesma amplitude nos três pontos de medição avaliados, indicando uma menor atenuação pelas paredes de concreto. Nas Figuras D.7 e D.8 se apresentam fotografias da instalação dos sensores para a realização destas medições.

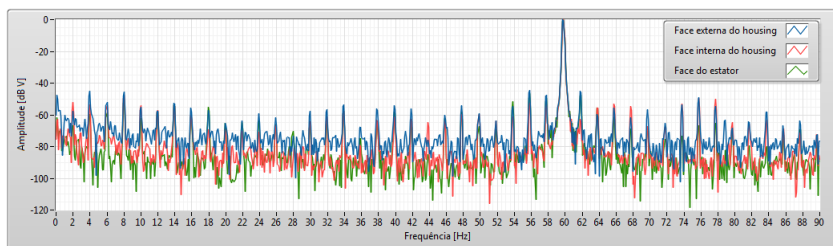


Figura D.5: Espectro da derivada do campo magnético dentro e fora do housing do gerador A.

Medidas de comparação de assinatura magnética entre dois geradores também foram realizadas, e seu resultado pode ser visto na Figura D.6. Como nesta instalação os geradores A e B avaliados têm o mesmo projeto construtivo, encontrou-se um padrão espectral muito semelhante. As pequenas diferenças de amplitude observadas para algumas componentes podem indicar particularidades de cada um dos equipamentos. Também nestes experimentos os sensores foram posicionados em um mesmo ponto em referência ao pacote estatórico de cada gerador, os quais funcionavam sob uma mesma condição de operação.

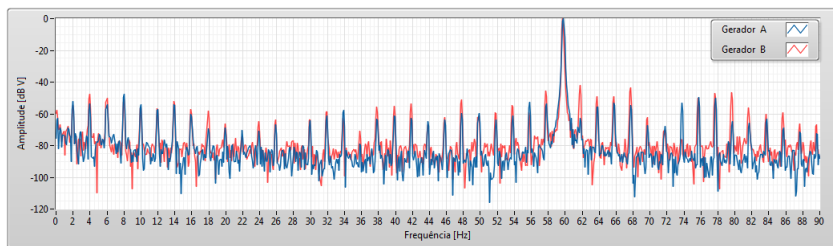


Figura D.6: Comparação do espectro da derivada do campo magnético externo aos housings dos geradores A e B.



Figura D.7: Medição na parte externa do housing do gerador A.



Figura D.8: Medição na parte interna do housing do gerador A.

Foi citado no texto principal desta tese que o sistema de medição está preparado para realizar medições com outros tipos de sensores.

Desta forma, durante os testes de medição dos campos externos às máquinas síncronas hidrelétricas, teve-se a oportunidade de medir também as correntes de saída dos geradores e de seus cabos de aterramento. Nas figuras D.9, D.10 e D.11 são mostrados os espectros destas correntes para os dois geradores de 350 MVA. A instalação dos sensores nos dutos de saída de uma das máquinas é mostrada na Figura D.12, enquanto na Figura D.13 vê-se o cabo de aterramento de um dos geradores.

Não são observadas quaisquer componentes sub-harmônicas ou inter-harmônicas nas três correntes medidas por sobre os dutos de blindagem dos cabos de saída do Gerador A. Obteve-se o mesmo resultados para todas as outras máquinas avaliadas nas duas plantas hidrelétricas. No entanto as correntes de neutro mostram sempre a presença de algumas destas componentes de frequência. Além disso, comparando por exemplo o espectro destas correntes para os geradores A e B de 350 MVA nota-se que também esta grandeza possui uma assinatura própria para cada máquina elétrica. O fato de a frequência de 60 Hz ter um valor de amplitude diferente de 0 dB nestas medições se deve à maneira como o cálculo da FFT do sinal do sensor foi realizado. O algoritmo utilizado para esta função assume como fundamental de referência a frequência de maior amplitude, que nestas medições foi a harmônica de 180 Hz.

Análises destes resultados devem levar em consideração que tais correntes fazem parte de circuitos complexos, com associação de equipamentos elétricos de proteção e de medição, transformadores de elevação e aterramento etc., podendo assim não depender exclusivamente das características de funcionamento da máquina síncrona.

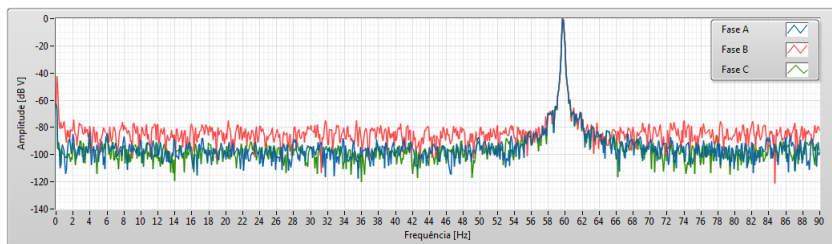


Figura D.9: Medição da derivada da corrente elétrica total medida sobre os dutos de blindagem dos cabos de saída do gerador A.

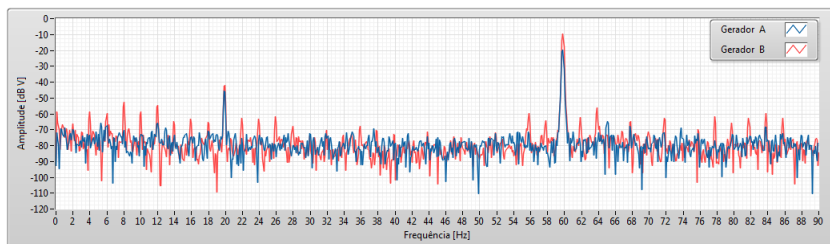


Figura D.10: Medição da derivada da corrente elétrica do cabo de aterramento do gerador A.

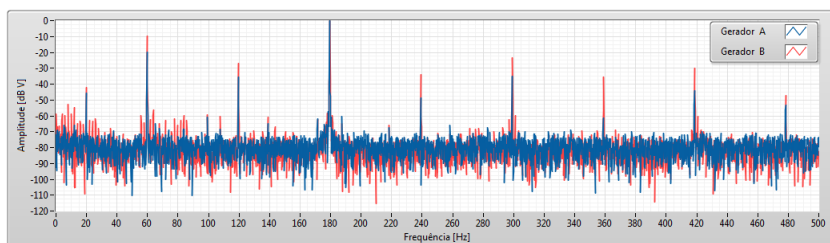


Figura D.11: Medição da derivada da corrente elétrica do cabo de aterramento do gerador A, para faixa de frequência até 300 Hz.

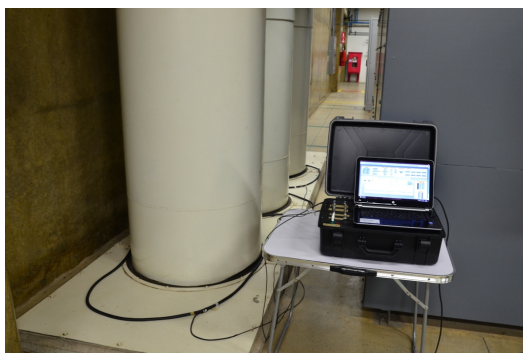


Figura D.12: Medição da corrente total nos dutos de blindagem dos cabos de saída do gerador A.



Figura D.13: Cabo de aterramento do gerador A.



# Referências Bibliográficas

- [1] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*, I. of Engineering and Technology, Eds. Londres: Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [2] J. Severo, K. Fantin, and M. Alves, “Experiência com a monitoração on-line de transformadores elevadores da usina de tucuruí,” *XXI SNPTEE*, 2011.
- [3] P. Tavner, B. Gaydon, and D. Ward, “Monitoring generators and large motors,” *IEE Proceedings*, vol. 133, no. 3, 1986.
- [4] E. Goodeve, “Keeping stator and rotor windings clean,” *Iris Power Diagnostic News*, 2008.
- [5] D. Howe and P. Hammond, “Examination of the axial flux in stator cores with particular reference to turbogenerators,” *IEE Proceedings*, vol. 121, no. 12, 1974.
- [6] P. Tavner, P. Hammond, and J. Penman, “Contribution to the study of leakage fields at the ends of rotating electrical machines,” *IEE Proceedings*, vol. 125, no. 12, 1978.
- [7] A. Anderson, T. Bedfrod, and A. Craddock, “Transient leakage flux in small universal motors,” *IEE Proceedings*, vol. 128, no. 5, 1981.
- [8] B. Belhoucine, A. Foggia, G. Meunier, M. Besseau, and H. Kermorgant, “3d finite element investigation of the magnetic field outside electromagnetic devices,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, no. 5, 1994.

- [9] G. Karady, S. Berisha, M. Muralidhar, J. Demcko, and M. Samotyj, "Variable speed motor drive generated magnetic fields," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, 1994.
- [10] A. A. Adam, K. Gulez, and S. Koroglu, "Stray magnetic field distributed around a pmsm," *Turk J Elec Eng and Comp Sci*, vol. 19, no. 1, 2011.
- [11] S. Koroglu, A. A. Adam, N. Umurkan, and K. Gulez, "Leakage magnetic flux density in the vicinity of induction motor during operation," *Springer-Verlag Electr Eng*, vol. 91, 2009.
- [12] G. L. Coat, P. L. Thiec, J.-P. Bongiraud, and A. Foggia, "Electromagnetic signature of induction machines," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, 1997.
- [13] L. Wei, S. Baowei, and H. Yuli, "Numerical simulation of a leakage magnetic flux for permanent magnet dc motors," *Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation*, 2011.
- [14] J. Germishuizen, "Emc of an induction motor: Measurements compared to calculations," *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [15] P. Ferrari, A. Mariscotti, A. Motta, and P. Pozzobon, "Electromagnetic emissions from electrical rotating machinery," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 1, 2001.
- [16] A. Anderson, "A note on generator core failures," <http://www.antony-anderson.com/failure1.htm>.
- [17] J. Wood and R. Hindmarch, "Rotor winding short detection," *IEE Proceedings*, vol. 133, no. 3, 1986.
- [18] D. R. Albright, "Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 90, no. 2, 1971.
- [19] M. Kiani, W.-J. Lee, R. Kenarangui, and B. Fahimi, "Detection of rotor faults in synchronous generators," *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED*, 2007.
- [20] M. Sasic, S. Campbell, and B. Lloyd, "Flux monitoring improvement," *IEEE Industry Applications Magazine*, September 2011.

- [21] B. A. T. Iamamura, “Contribuição à detecção de defeitos nos rotores de turboalternadores,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [22] J. Penman, M. Dey, A. Tait, and W. Bryan, “Condition monitoring of electrical drives,” *IEE Proceedings*, vol. 133, no. 3, 1986.
- [23] J. Penman, H. Sedding, and W. Fink, “Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, 1994.
- [24] G. Kliman, R. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden, “Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, 1988.
- [25] M. D. Negrea, “Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines,” Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, 2006.
- [26] V. Kokko, “Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements,” Ph.D. dissertation, University of Oulu, 2003.
- [27] C. C. M. Cunha, “Modelagem, análise e detecção de assimetrias de rotor em máquinas de indução,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [28] C. G. Dias, “Proposta de um novo método para detecção de barras rompidas em motores de indução com rotor em gaiola,” Ph.D. dissertation, Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2006.
- [29] J. Sprooten, “Finite element and electrical circuit modelling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques,” Ph.D. dissertation, Université Libre de Bruxelles, 2007.
- [30] V. P. Bui, “Diagnostic des machines electriques par l’analyse du champ magnetique de fuite application a l’identification de defauts rotoriques d’un alternateur a vide,” Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [31] G. Pole, “Application of magnetic fields to aid the detection and diagnosis of induction motor drive faults,” Ph.D. dissertation, University of Wales, 2009.

- [32] T. Assaf, H. Henao, and G. Capolino, "Simplified axial flux spectrum method to detect incipient stator inter-turn short-circuits in induction machine," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004.
- [33] A. Yazidi, H. Henao, G. A. Capolino, M. Artoli, F. Filippetti, and D. Casadei, "Flux signature analysis: an alternative method for the fault diagnosis of induction machines," *IEEE Russia Power Tech*, 2005.
- [34] R. Pusca, R. Romary, A. Ceban, and J. Brudny, "An online universal diagnosis procedure using two external flux sensors applied to the ac electrical rotating machines," *Sensors 2010*, vol. 10, no. 11, 2010.
- [35] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Eccentricity and broken rotor bars faults - effects on the external axial field," *XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM, Rome*, 2010.
- [36] A. Ceban, R. Pusc, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, 2012.
- [37] E. P. Manangement, "Csi 2130 machinery health analyzer, product data sheet," 2010.
- [38] M. V. Chari, S. R. Salem, S. Salon, and O.-M. Kwon, "Us 2009/0243647 a1 - non-invasive monitoring and diagnosis of electric machines by measuring external flux density," *General Electric Company*, 2009.
- [39] D. Thailly, R. Romary, J.-P. Lecoite, J.-F. Brudny, and P. Suau, "Synchronous machine diagnosis using an external magnetic flux sensor," *International Conference on Electrical Machines- ICEM, Chania*, 2006.
- [40] J.-F. Brudny, J.-P. Lecoite, F. Morganti, F. Zidat, and R. Romary, "Use of the external magnetic field for induction machine leakage inductance distinction," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010.
- [41] H. Ertan and O. Keysan, "External search coil as a means of measuring rotor speed of an induction motor," *ELECTROMOTION 2009 - Lille, France*, July 2009.

- [42] W. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors-past, present and future," *Second IEEE Internacional Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers - SDEMPED 99*, 1999.
- [43] O. Vitek and V. Hájek, "External magnetic field analysis of induction motor," Publicação interna - Universidade de Brno, República Tcheca, 2004.
- [44] V. Fireteanu and P. Taras, "Diagnosis of induction motor rotor faults based on finite element evaluation of voltage harmonics of coil sensors," *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2012.
- [45] F. Zidat, J.-P. Lecointe, F. Morganti, J.-F. Brudny, T. Jacq, and F. Streiff, "Non invasive sensors for monitoring the efficiency of ac electrical rotating machines," *Sensors*, 2010.
- [46] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, 2008.
- [47] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Ai techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, 1998.
- [48] A. Mertens and E. Ribeiro, "Uma abordagem sobre detecção de barras quebradas em motores de indução," *XIII ERIAC*, 2009.
- [49] J. Siau, A. Graff, W. Soong, and N. Ertugrul, "Broken bar detection in induction motors using current and flux spectral analysis," *Australasian Universities Power Engineering Conference, Christchurch, New Zealand.*, 2003.
- [50] I. Ahmed, N. Ertugrul, and W. Soong, "A study on the detection of fault frequencies for condition monitoring of induction machines," *Australasian Universities Power Engineering Conference, Tasmania, Australia*, 2005.
- [51] J. Brito, P. L. Filho, and R. Pederiva, "Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de corrente e análise de fluxo magnético," *X Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamentos*, 2001.

- [52] S. L. Nau, "Análise da influência da excentricidade do rotor sobre o ruído acústico de origem magnética gerado por motores de indução trifásicos," Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- [53] W. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, July 2001.
- [54] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, 2000.
- [55] S. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - a review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [56] J. Faiz and M. Ojaghi, "Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review," *Elsevier Mechatronics*, vol. 19, 2009.
- [57] M. J. Devaney and L. Eren, "Detecting motor bearing faults," *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, December 2004.
- [58] P. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines," *IET Electric Power Applications*, 2007.
- [59] W. McDennid, "Synchronous machine outages resulting from winding failures and defects," *Electric Machines and Drives International Conference - IEMD*, 1999.
- [60] R. Platt, L. Kerr, and A. Anderson, "Measuring flux and interlaminar voltage in turbine generator end regions," *International Conference on Electrical Machines - Design and Applications*, 1982.
- [61] M. Jenkins, "On-line monitoring of rotor shorted turns," *Conference on Life Management of Power Plants*, 1994.
- [62] R. Smith, "Monitoring for rotor shorted turns," *IEE Colloquium on Understanding your Condition Monitoring*, 1999.
- [63] P. Neti and S. Nandi, "Stator interturn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, 2009.

- [64] A. Elez, S. Car, and Z. Maljkovic, "Detection of inter-coil short circuits in synchronous machine armature winding on the basis of analysis of machine magnetic field," *XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM, Rome*, 2010.
- [65] D. R. Albright, D. J. Albright, and J. D. Albright, "Generator field winding shorted turn detection technology," *Disponível em <http://www.generatorotech.com/>*, 2012.
- [66] P. Neti, A. B. Dehkordi, and A. M. Gole, "A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton*, 2008.
- [67] G. Stone, M. Sasic, J. Stein, and C. Stinson, "Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts," *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE*, June 2012.
- [68] Q. Graham, "The m.m.f. wave of polyphase windings - with special reference to sub-synchronous harmonics," *Winter Convention of the A.I.E.E.*, 1297.
- [69] IEEE, "Subsynchronous resonance working group of the system dynamic performance subcommittee - reader's guide to subsynchronous resonance," *Transactions on Power Systems*, 1992.
- [70] R. I. Diego and J. Barros, "Subharmonic measurement using dft and wavelet-packet transform in an iec extended framework," *Elsevier Measurement*, 2010.
- [71] H.-C. Lin, "Sources, effects, and modelling of interharmonics," *Hindawi Publishing Corporation*, 2014.
- [72] S. A. Soliman and A. M. Alkandari, "Electric power systems harmonics - identification and measurements," *InTech*, 2011.
- [73] I. E. Commission, "Iec 61000.2.1 electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems," *IEC*, 1990.
- [74] I. I. T. F. C. C. . C. V. Q. W. Group, "Interharmonic in power system," *IEEE*, 1997.
- [75] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, Ed. USA: McGraw-Hill, 2005.

- [76] J. P. A. Bastos, *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática*, E. da UFSC, Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [77] M. Rigoni, “Desenvolvimento e aplicações de sensores de campo magnético por indução,” Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [78] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, C. Press, Ed. USA: CRC Press, 2011.
- [79] M. Rigoni, N. Sadowski, N. Batistela, J. P. Bastos, S. L. Nau, and A. Kost, “Detection and analysis of rotor faults in induction motors by the measurement of the stray magnetic flux,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 11, no. 1, 2012.